

VŠB – Technická Univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

Návrh měření průtoku přehřáté páry  
a napájecí vody pomocí dýz

Proposal of Measurement of Superheated  
Steam and Feed Water Flow Using Nozzles

Student: Tomáš Hegr  
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Stáňa, PhD.

Ostrava 2010

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Tomáš Hegr**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3907R004 Provoz a řízení v energetice

Téma:

Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí dýz

### Proposal of Measurement of Superheated Steam and Feed Water Flow Using Nozzles

Zásady pro vypracování:

- 1) Porovnejte nejčastěji v energetice používané způsoby měření průtoku.
- 2) Porovnejte jednotlivé typy dýz.
- 3) Navrhněte měření průtoku napájecí vody pomocí dýzy pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy.
- 4) Navrhněte měření průtoku přehřáté páry pomocí dýzy pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy.
- 5) Posuďte vhodnost použití termočlánku a odporového snímače teploty Pt100.
- 6) Porovnejte navržené varianty z hlediska ekonomického a z hlediska přesnosti měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN ISO 5167 – 1 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky, Český normalizační institut, listopad 2003
- [2] ČSN EN ISO 5167 – 3 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 3: Dýzy a Venturiho dýzy, Český normalizační institut, listopad 2003
- [3] BEJČEK, L., ĎAĎO, S., PLATIL, A. *Měření průtoku a výšky hladiny*, BEN 2006
- [4] KOČIŠ, Š., STÁŇA, M., VILÍMEC, L. *Provoz a regulace energetických zařízení*, VŠB 2007
- [5] [www.mattech.cz](http://www.mattech.cz)
- [6] [www.yokogawa.cz](http://www.yokogawa.cz)
- [7] [www.emersonprocess.cz](http://www.emersonprocess.cz)

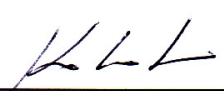
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

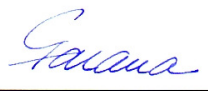
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Stáňa, PhD.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



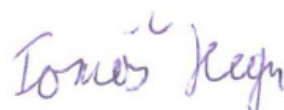
  
prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě: 20. 5. 2010

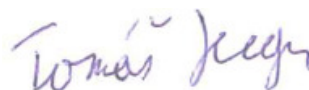


.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 20. 5. 2010



.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Tomáš Hegr

Adresa trvalého pobytu autora práce: Karlova Studánka 2, Karlova Studánka, 793 24

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

HEGR, T. *Návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí dýz : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010, 56 s. Vedoucí práce: Stáňa, M.

Tato bakalářská práce se zabývá nejčastěji v energetice používanými způsoby měření průtoku tekutin. Představuje základní průtoková měřidla - jak rychlostí, tak objemová. Popisuje jejich princip, způsob použití a navzájem je mezi sebou porovnává. V této práci je kladen důraz na měření průtoku pomocí škrtících orgánů a to konkrétně dýz. V praktické části je zpracován návrh měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pomocí dýzy pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy. Dále je zde posuzována vhodnost použití termočlánku a odporového snímače teploty Pt100. Na závěr jsou porovnány navržené varianty měření z hlediska ekonomického a z hlediska přesnosti měření.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

HEGR, T. *Proposal of the Measurement of the Superheated Steam and the Feed Water Flow Using the Nozzles : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical engineering, Department of Energetics, 2010, 56 p. Thesis head: Stáňa, M.

The most frequent methods of measuring the liquid flow are presented in this bachelor thesis. It is the introduction to the essential flow measuring instruments - either for velocity and for volume. The principle and the technique of usage are described and compared mutually. The emphasis is put on the flow measurement through the use of throttling bodies, nozzles concretely. The flow measurement of superheated steam and the feed water flow by nozzles for two sensors of differential pressure with various amplitudes are designed in the applicative part of the bachelor thesis. Farther, the suitability of the thermojunction application and the resistance sensor of the temperature Pt100 are judged. In conclusion, the suggested variants of the measuring are compared in the light of economics and measuring preciseness.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

- měření průtoku
- měřící metody
- použití
- dýza

## **KEYWORDS**

- flow measurement
- method of measurement
- using
- nozzle

# OBSAH:

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A INDEXŮ .....  | 8  |
| 1.1   | Značení a jednotky .....  | 8  |
| 1.2   | Indexy .....  | 9  |
| 2     | ÚVOD .....  | 10 |
| 2.1   | Termíny a definice .....  | 11 |
| 2.1.1 | Měření tlaku .....  | 11 |
| 2.1.2 | Primární prvky .....  | 11 |
| 2.1.3 | Proudění .....  | 12 |
| 3     | CHARAKTERISTIKY MĚŘÍCÍCH METOD .....  | 13 |
| 3.1   | Rychlost proudění .....   | 13 |
| 3.2   | Objemový průtok .....   | 14 |
| 3.3   | Hmotnostní průtok .....   | 15 |
| 3.3.1 | Určení pomocí nepřímé metody .....  | 15 |
| 3.3.2 | Určení pomocí přímé metody .....  | 15 |
| 3.4   | Proteklé množství .....   | 15 |
| 4     | ZPŮSOBY MĚŘENÍ PRŮTOKU .....  | 16 |
| 4.1   | Objemové průtokoměry .....  | 16 |
| 4.1.1 | Objemová měřidla s přerušovaným měřením .....                                 | 16 |
| 4.1.2 | Objemová měřidla s nepřerušovaným měřením .....                               | 16 |
| 4.1.3 | Použití objemových průtokoměrů .....  | 18 |
| 4.2   | Rychlostní průtokoměry .....  | 18 |
| 4.2.1 | Průtokoměry turbínové a lopatkové .....                                       | 18 |
| 4.2.2 | Průtokoměry s měřením rozdílu tlaku .....                                     | 20 |
| 4.3   | Elektromagnetické indukční průtokoměry .....                                  | 22 |
| 4.4   | Ultrazvukové průtokoměry .....  | 24 |
| 4.4.1 | Průtokoměry založené na Dopplerově jevu .....                                 | 24 |
| 4.4.2 | Průtokoměry s měřenou dobou průchodu signálu .....                            | 25 |
| 4.5   | Virové průtokoměry .....  | 26 |
| 5     | PRŮŘEZOVÁ MĚŘIDLA .....   | 27 |
| 5.1   | Tlakové poměry v okolí škrtkého orgánu .....                                  | 27 |
| 5.2   | Porovnání jednotlivých škrtkých orgánů na základě trvalé tlakové ztráty ..... | 28 |
| 5.3   | Clona .....   | 28 |
| 5.3.1 | Základní druhy clon .....   | 28 |
| 5.4   | Venturiho trubice .....   | 29 |
| 5.5   | Dýza .....  | 30 |
| 5.5.1 | Základní typy dýz .....   | 31 |
| 6     | POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRŮTOKOMĚRŮ .....                                      | 32 |
| 7     | NÁVRH MĚŘENÍ PRŮTOKU POMOCÍ DÝZ .....   | 33 |
| 7.1   | Princip metody měření a výpočet .....   | 33 |
| 7.2   | Návrh měření průtoku napájecí vody .....                                      | 33 |
| 7.2.1 | Meze použití dýzy ISA 1932 .....  | 34 |
| 7.2.2 | Postup výpočtu .....  | 34 |
| 7.3   | Návrh měření průtoku přehřáté páry .....                                      | 39 |
| 7.3.1 | Postup výpočtu .....  | 39 |
| 7.3.2 | Výpočet v EES .....   | 40 |
| 8     | URČENÍ ROZMĚRŮ DÝZY ISA 1932 .....  | 44 |
| 8.1   | Rozměry dýzy pro napájecí vodu .....  | 45 |
| 8.1.1 | Materiály dýzy .....  | 46 |
| 8.2   | Rozměry dýzy pro přehřátou páru .....   | 46 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 8.2.1  | Materiál dýzy .....   | 47 |
| 9      | ODBĚRY TLAKU .....  | 47 |
| 9.1    | Odběr tlaku před dýzou.....   | 47 |
| 9.2    | Odběry tlaku za dýzou .....   | 48 |
| 10     | POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH VARIANT Z HLEDISKA EKONOMICKÉHO A<br>Z HLEDISKA PŘESNOSTI MĚŘENÍ ..... | 49 |
| 10.1   | Posouzení vhodnosti použití termočlánku a odporového snímače teploty .....                  | 49 |
| 10.2   | Porovnání navržených variant z hlediska přesnosti měření.....                               | 50 |
| 10.3   | Porovnání navržených variant z hlediska ekonomického .....                                  | 51 |
| 10.3.1 | Výkon turbíny bez seškrcení s nulovým diferenčním tlakem.....                               | 51 |
| 10.3.2 | Výkon turbíny při seškrcení s diferenčním tlakem 350 kPa.....                               | 52 |
| 10.4   | Ekonomické srovnání termočlánku K a odporového snímače teploty Pt100 A ..                   | 53 |
| 11     | ZÁVĚR .....   | 54 |
|        | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....   | 56 |
|        | SEZNAM PŘÍLOH.....  | 56 |

# 1 SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A INDEXŮ

## 1.1 Značení a jednotky

| Značka               | Veličina   | Rozměr <sup>a</sup>                                  | Jednotka SI                                      |
|----------------------|--|--|--|
| $C$                  | součinitel průtoku   | bezrozměrový   | 1  |
| $C_{m,p}$            | molární tepelná kapacita při konstantním tlaku   | $\text{ML}^2\text{T}^{-2}\Theta^{-1}\text{mol}^{-1}$ | $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| $d$                  | průměr otvoru clony nebo hrdla za provozních podmínek  | L  | m  |
| $D$                  | vnitřní průměr potrubí před (nebo vstupní průměr klasické trubice Venturiho) při provozních podmínkách | L  | m  |
| $H$                  | entalpie   | $\text{ML}^2\text{T}^{-2}\text{mol}^{-1}$            | $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$                   |
| $k$                  | homogenní ekvivalentní drsnost   | L  | m  |
| $K$                  | součinitel tlakové ztráty (poměr tlakové ztráty k dynamickému tlaku $\rho V^2/2$ )                     | bezrozměrový   | 1  |
| $I$                  | vzdálenost odběru tlaku  | L  | m  |
| $L$                  | relativní vzdálenost odběru tlaku ( $L = I/D$ )  | bezrozměrový   | 1  |
| $p$                  | absolutní statický tlak tekutiny   | $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$                        | Pa   |
| $q_m$                | hmotnostní průtok  | $\text{MT}^{-1}$                                     | $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$                    |
| $q_v$                | objemový průtok  | $\text{L}^3\text{T}^{-1}$                            | $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$                   |
| $R$                  | poloměr  | L  | m  |
| $Ra$                 | střední aritmetický úchylka (drsnosti) profilu   | L  | m  |
| $R_u$                | univerzální plynová konstanta  | $\text{ML}^2\text{T}^{-2}\Theta^{-1}\text{mol}^{-1}$ | $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| $Re$                 | Reynoldsovo číslo  | bezrozměrový   | 1  |
| $Re_D$               | Reynoldsovo číslo vztažené k $D$   | bezrozměrový   | 1  |
| $Re_d$               | Reynoldsovo číslo vztažené k $d$   | bezrozměrový   | 1  |
| $t$                  | teplota tekutiny   | $\Theta$   | $^{\circ}\text{C}$                               |
| $T$                  | absolutní (termodynamická) teplota tekutiny  | $\Theta$   | K  |
| $U'$                 | relativní nejistota  | bezrozměrový   | 1  |
| $v$                  | střední axiální rychlost tekutiny v potrubí  | $\text{LT}^{-1}$                                     | $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$                     |
| $Z$                  | faktor kompresibility  | bezrozměrový   | 1  |
| $\beta$              | poměr průměrů ( $\beta = d/D$ )  | bezrozměrový   | 1  |
| $\gamma$             | poměr měrných tepelných kapacit <sup>b</sup>   | bezrozměrový   | 1  |
| $\Delta p$           | diferenční tlak  | $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$                        | Pa   |
| $\Delta p_c$         | tlaková ztráta vyvozená usměrňovačem proudění  | $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$                        | Pa   |
| $\Delta\bar{\omega}$ | tlaková ztráta vyvozená primárním prvkem   | $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$                        | Pa   |
| $\varepsilon$        | součinitel expanze   | bezrozměrový   | 1  |
| $\kappa$             | izoentropický exponent <sup>b</sup>  | bezrozměrový   | 1  |



| Značka     | Veličina   | Rozměr <sup>a</sup>              | Jednotka SI                    |
|------------|--|----------------------------------|--------------------------------|
| $\lambda$  | součinitel tření   | bezrozměrový                     | 1                              |
| $\mu$      | dynamická viskozita tekutiny   | $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$    | $\text{Pa}\cdot\text{s}$       |
| $\mu_{JT}$ | Joule Thomsonův koeficient   | $\text{M}^{-1}\text{LT}^2\Theta$ | $\text{K}\cdot\text{Pa}^{-1}$  |
| $\nu$      | kinematická viskozita tekutiny ( $\nu = \mu/\rho$ )                  | $\text{L}^2\text{T}^{-1}$        | $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ |
| $\xi$      | relativní tlaková ztráta (poměr tlakové ztráty k diferenčnímu tlaku) | bezrozměrový                     | 1                              |
| $\rho$     | hustota tekutiny   | $\text{ML}^{-3}$                 | $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  |
| $\tau$     | poměr tlaků ( $\tau = p_1/p_2$ )                                     | bezrozměrový                     | 1                              |
| $\Phi$     | celkový úhel difuzorové části  | bezrozměrový                     | rad                            |

<sup>a</sup> M = hmotnost, L = délka, T = čas,  $\Theta$  = teplota

<sup>b</sup>  $\gamma$  je poměr měrné tepelné kapacity při stálém tlaku k měrné tepelné kapacitě při stálém objemu. Pro ideální plyny poměr měrných tepelných kapacit a izoentropický exponent mají stejnou hodnotu. Tyto hodnoty závisí na vlastnostech plynu.

<sup>c</sup> Rozměry a jednotky jsou stejné jako příslušné veličiny

## 1.2 Indexy

| Index | Význam                |
|-------|-----------------------|
| 1     | před škrťícím orgánem |
| 2     | za škrťícím orgánem   |
| 20    | při teplotě 20°C      |
| ap    | admisní pára          |
| d     | vztaženo k $d$        |
| D     | vztaženo k $D$        |
| jm    | jmenovitý             |
| max   | Maximální             |
| min   | minimální             |
| NV    | napájecí voda         |
| sk    | Skutečný              |
| t     | při teplotě t         |
| vyp   | Vypočtené             |
| '     | od základní strany    |

## 2 ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá způsobem měření průtoku tekutin v potrubí pomocí dostupných měřidel a postupů. Představuje nejběžněji používané metody a škrťící orgány. Tyto porovnává mezi sebou. Mezi nejdůležitější důvody měření průtoku v energetice jsou především požadavky na regulaci, bilanční technicko-ekonomické hodnocení a fakturační měření.

Pro měření průtoků plynů a kapalin existuje velká řada metod, ve kterých se využívá velmi mnoho rozličných přístrojů, které pracují na základě různých fyzikálních principů. Existence velkého množství průtokoměrů je způsobena tím, že se v praxi vyskytují velké rozdíly v chemických i fyzikálních vlastnostech tekutin. Jednotlivé typy přístrojů mají pokaždé určité přednosti i nedostatky, ze kterých plyne výběr vhodného typu měřidla. Současný trend vývoje průtokoměrů se zaměřuje na přímé měření hmotnostního průtoku, tj. měření nezávislé na teplotě, tlaku a viskozitě měřené tekutiny.

Můžeme měřit například průtok vody v řečišti, potoce, přehradní výpusti v řádech tisíců [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ], při spotřebě pitné vody v domácnostech nebo pro dávkování nepatrných množství v nejrůznějších technologických procesech v řádech nižších než [ $\text{ml}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]. Mnohé metody měření průtoků jsou principiálně shodné jak pro měření průtoku plynu, tak kapalin. Měření průtoku tekutin patří mezi důležité oblasti měření neelektrických veličin.

## 2.1 Termíny a definice

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [1].

### 2.1.1 Měření tlaku

**odběr tlaku ve stěně** (*wall pressure tapping*)

prstencová nebo kruhová dutina, vyvrtaná ve stěně potrubí takovým způsobem, že hrana dutiny lícuje s vnitřním povrchem potrubí

**statický tlak tekutiny proudící potrubím** (*static pressure of a fluid flowing through a pipeline*)  $p$  [Pa]

tlak, který může být změřen připojením tlakoměru na odběr tlaku ve stěně

**diferenční tlak** (*differential pressure*)  $\Delta p$  [Pa]

rozdíl mezi (statickými) tlaky měřenými v odběrech tlaku ve stěně, z nichž jeden je před a druhý za primárním prvkem (nebo v hrdle Venturiho dýzy nebo Venturiho trubice), vloženým do přímého potrubí, jímž protéká tekutina, při uvažování všech rozdílů ve výšce odběru před a za primárním prvkem

**poměr tlaků** (*pressure ratio*)  $\tau$  [1]

poměr absolutního (statického) tlaku v odběru za primárním prvkem k tlaku v odběru před primárním prvkem

### 2.1.2 Primární prvky

**clona, hrdlo** (*orifice, throat*)

nejmenší otvor primárního prvku

**clonový kotouč** (*orifice plate*)

tenká deska, v níž je vytvořen kruhový otvor

**dýza** (*nozzle*)

prvek sestává z konvergentního vtoku, spojeného s válcovitým úsekem, obecně nazývaným „hrdlo“

**Venturiho dýza** (*Venturi nozzle*)

prvek sestává z konvergentního vtoku, kterým je normalizovaná dýza ISA 1932 spojená s válcovitou částí nazývanou „hrdlo“ a rozšiřujícím se kuželovitým úsekem nazývaným „difuzor“

**Venturiho trubice** (*Venturi tube*)

prvek sestávající z konvergentního vtoku, který je kuželovitý a spojený s válcovitou částí nazývanou „hrdlo“ a rozšiřujícím se kuželovitým úsekem nazývaným „difuzor“

**poměr průměrů** (*diameter ratio*)  $\beta$  [1]

poměr průměrů clonového otvoru (nebo hrdla) primárního prvku k vnitřnímu průměru měřicího potrubí před primárním prvkem

### 2.1.3 Proudění

**Průtok** (*flowrate, rate of flow*)  $q$

hmotnost nebo objem tekutiny proudící otvorem clony (nebo hrdla) za jednotku času

**hmotnostní průtok** (*mass flowrate, rate of mass flow*)  $q_m$  [kg·s<sup>-1</sup>]

hmotnost tekutiny proudící otvorem clony (nebo hrdla) za jednotku času

**objemový průtok** (*volume flowrate, rate of volume flow*)  $q_v$  [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>]

objem tekutiny proudící otvorem clony (nebo hrdla) za jednotku času

**Reynoldsovo číslo** (*Reynolds number*)  $Re$  [1]

bezrozměrný parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými silami a třecími silami

**Reynoldsovo číslo potrubí** (*pipe Reynolds number*)  $Re_D$  [1]

bezrozměrný parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými silami a třecími silami v potrubí před primárním prvkem

$$Re_D = \frac{V_1 \cdot D}{\nu_1} = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu_1 \cdot D} \quad [1] \quad (1)$$

kde:  $V_1$ ... je objem tekutiny [m<sup>3</sup>]

$D$ ... je vnitřní průměr potrubí [m]

$\nu_1$ ... je střední axiální rychlost tekutiny v potrubí [m·s<sup>-1</sup>]

$q_m$ ... je hmotnostní průtok [kg·s<sup>-1</sup>]

$\mu_1$ ... je dynamická viskozita tekutiny [Pa·s]

**Reynoldsovo číslo clony nebo hrdla** (*kritice or throat Reynolds number*)  $Re_d$  [1]

bezrozměrný parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými silami a třecími silami ve cloně nebo v hrdle primárního prvku

$$Re_d = \frac{Re_D}{\beta} \quad [1] \quad (2)$$

kde:  $Re_D$ ... je Reynoldsovo číslo potrubí [1]

$\beta$ ... je poměr průměrů ( $\beta = d/D$ ) [1]

**izoentropický exponent** (*isentropic exponent*)  $\kappa$  [1]

poměr relativní změny tlaku k odpovídající relativní změně hustoty za podmínek elementární vratné adiabatické (izentropické) změny

**součinitel průtoku** (*discharge coefficient*)  $C$  [1]

součinitel stanovený pro proud nestlačitelné tekutiny, který udává poměr skutečného průtoku primárním prvkem k teoretickému průtoku

$$C = \frac{q_m \cdot \sqrt{1 - \beta^4}}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}} \quad [1] \quad (3)$$

kde:  $q_m$ ... je hmotnostní průtok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\beta$ ... je poměr průměrů ( $\beta = d/D$ ) [1]

$d$ ... je průměr otvoru clony nebo hrdla za provozních podmínek [m]

$\Delta p$ ... je diferenční tlak [Pa]

$\rho_1$ ... je hustota protékajícího média [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

**součinitel expanze** (*expasibility [expansion] factor*)  $\varepsilon$  [1]

součinitel, který se používá k výpočtu stlačitelnosti tekutiny

$$\varepsilon = \frac{q_m \cdot \sqrt{1 - \beta^4}}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot C \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho_1}} \quad [1] \quad (4)$$

kde:  $q_m$ ... je hmotnostní průtok [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\beta$ ... je poměr průměrů ( $\beta = d/D$ ) [1]

$d$ ... je průměr otvoru clony nebo hrdla za provozních podmínek [m]

$C$ ... je součinitel průtoku [1]

$\Delta p$ ... je diferenční tlak [Pa]

$\rho_1$ ... je hustota protékajícího média [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

**střední aritmetická úchylka (drsnosti) profilu** (*arithmetical mean derivation of the roughness profile*)  $Ra$  [m]

střední aritmetická úchylka od střední čáry profilu, v němž se má měřit

### 3 CHARAKTERISTIKY MĚŘÍCÍCH METOD

Pojem průtok se často používá jak pro označení rychlosti proudění, tak i jako označení hmotnostního průtoku nebo objemového průtoku v určitém průřezu  $S$  za časovou jednotku. Ovšem mezi těmito pojmy je určitý rozdíl. Snímače lze rozdělit podle různých hledisek, např. podle používané měřicí metody. Metody měření průtoků se dělí do tří hlavních skupin a to na metody objemové, rychlostní a hmotnostní. Pro všechny metody měření je nutno zajistit dostatečně dlouhé přímé potrubí před i za měřícím elementem.

#### 3.1 Rychlost proudění

Pro stanovení rychlosti proudění se využívá zákon zachování energie v proudící tekutině vyjádřeného *Bernoulliho* rovnicí dle rovnice (7). Při proudění tekutiny vzniká kinetická energie, která způsobuje nárůst dynamického a pokles statického tlaku, přičemž celkový tlak zůstává zachován.

Při uvažování tlaku jako hustoty energie můžeme vyjádřit:

$$p_s = p + \rho \cdot g \cdot h \quad [\text{Pa}] \quad (5)$$

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad [\text{Pa}] \quad (6)$$

$$p_c = p_s + p_d \quad [\text{Pa}] \quad (7)$$

kde:  $p_s \dots$  je tlak statický [Pa]

$p_d \dots$  je tlak dynamický [Pa]

$p_c \dots$  je tlak celkový [Pa]

$g = 9,81 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}]$  je gravitační zrychlení

$p = 101325 \text{ [Pa]}$  je tlak atmosférický

$h \dots$  je výška hladiny média v sloupci [m]

$v \dots$  je střední axiální rychlost tekutiny v potrubí [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\rho \dots$  je hustota protékajícího média [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

Obecný tvar Bernoulliho rovnice je:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konst.} \quad (8)$$

kde:  $g = 9,81 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}]$  je gravitační zrychlení

$p \dots$  je tlak v potrubí [Pa]

$h \dots$  je výška hladiny média v sloupci [m]

$v \dots$  je střední axiální rychlost tekutiny v potrubí [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\rho \dots$  je hustota protékajícího média [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

Pro dvě místa ve vodorovném potrubí:

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 \quad (9)$$

kde:  $p_{1,2} \dots$  je tlak v potrubí [Pa]

$v_{1,2} \dots$  je střední axiální rychlost tekutiny v potrubí [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\rho \dots$  je hustota protékajícího média [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

## 3.2 Objemový průtok

Objemovým průtokem označujeme objem tekutiny, který projde potrubím za jednotku času. Pro zjištění objemového průtoku se využívá měření pomocí rozdílů tlaků nebo výpočet z rychlosti proudění tekutiny v potrubí o známém průřezu. Předpokládáme ovšem, že tekutina zaplňuje celé potrubí, což nemusí vždy odpovídat skutečnosti. Při měření průtoku kapalin je někdy potřeba provádět korekci objemového průtoku na změny teploty a tlaku. U měření průtoku plynů a par musíme tyto korekce provádět vždy vzhledem ke stlačitelnosti proudícího média. [2]

Vztah pro stacionární objemový průtok:

$$Q_V = \frac{V}{\tau} = S \cdot v \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (10)$$

kde:  $V$ ... je objem tekutiny [ $m^3$ ]

$\tau$ ... je čas [s]

$S$ ... je vnitřní průřez potrubí [m]

$v$ ... je střední axiální rychlost tekutiny v potrubí [ $m \cdot s^{-1}$ ]

Vztah pro objem tekutiny:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad [m^3] \quad (11)$$

kde:  $m$ ... je hmotnost tekutiny [kg]

$\rho$ ... je hustota tekutiny [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

### 3.3 Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok udává hmotnost tekutiny, která proteče potrubím za jednotku času. V současné době se pro stanovení hmotnostního průtoku používají nepřímé i přímé metody.

#### 3.3.1 Určení pomocí nepřímé metody

Nepřímo lze hmotnostní průtok a proteklá hmotnost vypočítat dle rovnice (12). Musíme však znát hustotu protékajícího média. Hustota čistých kapalin závisí pouze na teplotě a jsou-li změny teploty malé, lze hustotu pokládat za konstantu. Závisí-li hustota měřeného média na jeho složení a také na teplotě, musí být hustota měřena.

Vztah pro stacionární hmotnostní průtok:

$$Q_m = \frac{m}{\tau} = Q_V \cdot \rho = \frac{V}{\tau} \cdot \rho = S \cdot v \cdot \rho \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (12)$$

kde:  $m$ ... je hmotnost tekutiny [kg]

$S$ ... je vnitřní průřez potrubí [ $m^2$ ]

$\tau$ ... je čas [s]

$\rho$ ... je hustota tekutiny [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$V$ ... je objem tekutiny [ $m^3$ ]

$v$ ... je střední axiální rychlost tekutiny v potrubí [ $m \cdot s^{-1}$ ]

#### 3.3.2 Určení pomocí přímé metody

Nejčastěji se hmotnostní průtok za pomoci přímé metody určuje prostřednictvím průtokoměrů založených na Coriolisově jevu a pomoci tepelných hmotnostních průtokoměrů. Podrobněji jsou tyto metody popsány v literatuře [4].

### 3.4 Proteklé množství

Je to objem nebo hmotnost tekutiny prošlé určitým místem potrubí za určitou dobu. Mezi průtokoměry, které měří proteklé množství, patří plynoměry nebo vodoměry v průmyslu a domácnostech.

## 4 ZPŮSOBY MĚŘENÍ PRŮTOKU

### 4.1 Objemové průtokoměry

Objemové měření průtoku patří mezi absolutní metody. Měřidla využívající tento princip se proto používají pro přesná bilanční měření a jako etalony pro ověřování jiných měřidel. Z hlediska kontinuity měření můžeme objemová měřidla rozdělit do dvou základních skupin: objemová měřidla s přerušovaným nebo nepřerušovaným měřením.

#### 4.1.1 Objemová měřidla s přerušovaným měřením

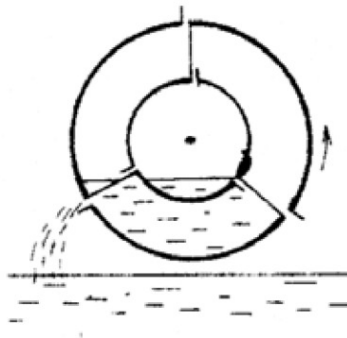
Používají se především v laboratořích. Objem kapalin se měří odměrnými (přesně kalibrovanými) nádobami nebo se stanovují nepřímou vážením.

#### 4.1.2 Objemová měřidla s nepřerušovaným měřením

Používají se převážně při provozních měřeních. Uplatňují se jako vodoměry, plynoměry či měřiče pohonných hmot. Průtokoměry určené pro měření objemového průtoku měří objem tekutiny přímo, rozdělením objemu do samostatných odměrných prostor se známým objemem. Pokud vynásobíme známý objem odměrného prostoru počtem postupně naplněných prostor, získáme hodnotu objemu tekutiny, která protekla potrubím za určitou měřenou dobu. Objemové průtokoměry obvykle na počítadle ukazují celkový proteklý objem, ale mohou mít na výstupu i impulsy odpovídající počtu naplněných prostor. Existuje velký počet těchto dávkovacích průtokoměrů, které se liší velikostí naplňovaných prostor, tvarem prostor, uložením lopatek atd. [2]

##### 4.1.2.1 Rotační bubnové průtokoměry

V rotačních (bubnových) přístrojích se kapalina přivádí trubicí do měrného válce, který je rozdělen na tři části viz. *obr. 1*. Kapalina přepadává pouze do jedné komory. Po jejím naplnění přeteče kapalina do druhé komory, tím se poruší rovnováha a buben se pootočí tak, aby se naplnila druhá komora. Stačí měřit počet otáček nebo pootočení, protože známe objem komory. [3]

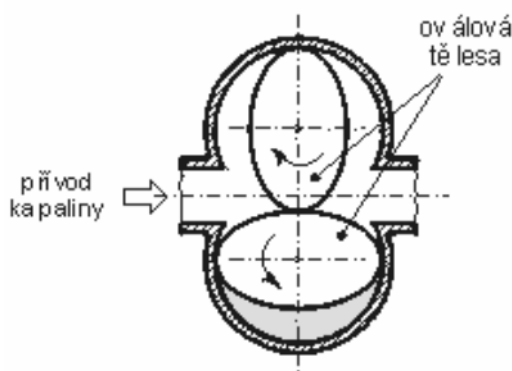


*Obr. 1. Rotační bubnový průtokoměr [3]*



#### 4.1.2.2 Tělesové oválné průtokoměry

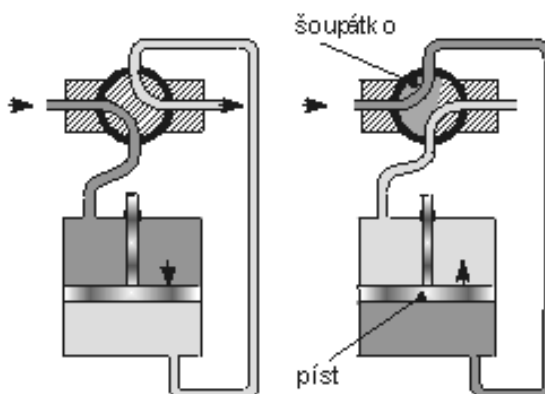
V komoře se pohybují dvě oválná tělesa, jejichž pohyb je vzájemně vázán buď ozubením přímo na tělesech, nebo prostřednictvím ozubených kol. Rozdílem tlaku na přední a zadní straně těles dojde k jejich otáčivému pohybu, a tím i k odměřování tekutiny. Těchto měřidel se používá k měření různých organických kapalin a produktů petrochemického průmyslu i potravinářských produktů (např. k měření proteklého množství mléka). viz. *obr. 2*. Tento typ je velmi vhodný pro měření průtoků plynů.



*Obr. 2. Tělesový oválný průtokoměr [4]*

#### 4.1.2.3 Pístové průtokoměry

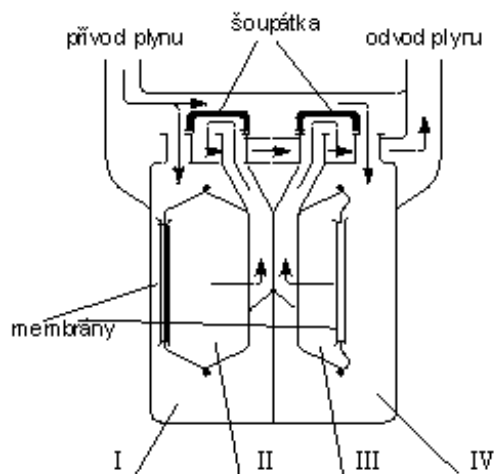
Patří mezi nejpřesnější přístroje pro měření proteklého množství kapalin. Tyto měřidla jsou vhodná i pro měření velmi viskózních kapalin. Měřenou kapalinou se střídavě naplňují a vyprazdňují odměrné prostory, které jsou vymezené pístem a válcem měřidla. Pohyb je způsoben rozdílným tlakem ve válcových komorách na povrchu pístu. Běžně se užívá dvou i více odměrných prostorů, jejichž funkce je svázána tak, aby byl zajištěn plynulý chod měřidla i nepřerušovaný průtok média. Na *obr. 3* můžeme vidět princip činnosti takového průtokoměru. Na základě rozdílu tlaku na povrchu pístu v prvním válci směřuje tento píst směrem dolů a tím je zároveň vytlačován druhý píst v druhém válci. Pístní tyč pak ovládá šoupátkový rozvod počítadlo.



*Obr. 3. Pístový průtokoměr [4]*

#### 4.1.2.4 Membránové plynoměry

Používají se ve spotřebitelských sítích k měření množství topných plynů. Jeden z nich je znázorněn na *obr. 4*. Ve společném pouzdrů jsou dvě komory rozdělené koženými membránami, čímž jsou vytvořeny čtyři odměrné prostory I až IV. Každý prostor je spojen hrdlem s rozvodným ústrojím, tvořenými šoupátky, jejichž pohyb je odvozen od pohybu membrán. Od pákového ústrojí je odvozen i pohyb počítadla.



*Obr.4. Membránový plynoměr [4]*

#### 4.1.3 Použití objemových průtokoměrů

Vzhledem k tomu, že tyto průtokoměry obsahují velké množství pohyblivých částí, nejsou vhodné pro měření průtoku znečištěných kapalin a kapalin obsahujících pevné částice. Navíc způsobují tlakovou ztrátu. Vzhledem k těsnému uložení jednotlivých částí průtokoměru, nejsou tyto vhodné pro měření průtoku horkých tekutin. Vlivem teplotní roztažnosti by mohlo dojít k zvětšení jednotlivých částí a tak i k zadření měřidla. Maximální přípustná teplota tekutiny měřené těmito měřidly je 200 [°C] a maximální tlak je 0,5 [MPa]. Jsou však vhodné k měření malých průtoků a jsou schopny měřit s přesností 0,2 – 2 [%].

#### 4.2 Rychlostní průtokoměry

Rychlostní průtokoměry určují průtok na základě naměřené hodnoty místní nebo průměrné rychlosti, znalosti profilu proudění a průtočného průřezu.

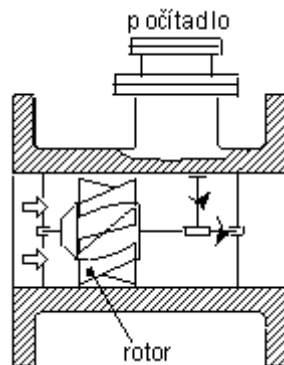
##### 4.2.1 Průtokoměry turbínové a lopatkové

Základem těchto rychlostních průtokoměrů je lopatkové, nebo šroubové kolo (kulička), které uvádí do otáčivého pohybu kinetická energie proudící kapaliny. Rychlost otáčení kola je úměrná rychlosti proudu, procházejícího příčným průřezem měřidla.

Pro snímání otáčivé rychlosti rotorů se používají snímače indukční, fotoelektrické, elektromagnetické, odporové, radiační apod. Na výstupu těchto zařízení dostáváme kmitočet signálu úměrný průtoku. Podle směru proudění vzhledem k ose rotoru rozlišujeme průtokoměry axiální a radiální.

#### 4.2.1.1 Axiální turbínové průtokoměry

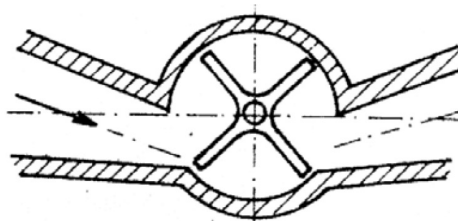
Axiální typ má osu rovnoběžnou se směrem proudění, je řešen jako turbína, nebo šroubovice (Woltmanův přístroj) *obr. 5*. Rotor je vytvořen z lopatek (obvykle čtyř nebo osmi) připevněných k náboji uloženému v ložiskách. Ložiska jsou upevněna do ramen, která slouží jako usměrňovače proudu. Proudění přicházející na lopatky zařízení musí být ustálené. Měřidla se vyrábí v širokém rozmezí měřících rozsahů a do potrubí je lze montovat v libovolné poloze.



*obr. 5. Axiální turbínový průtokoměr [4]*

#### 4.2.1.2 Radiální lopatkové průtokoměry

Přístroje radiální mají osu rotace ploch lopatkového kola kolmou ke směru proudění tekutiny a zároveň je kolmá k ose vtokového a výtokového otvoru *obr. 6*. Vtékající tekutina roztáčí lopatkové kolo. Otáčky se snímají stejně jako u turbínových průtokoměrů. Při otáčení kola vznikají hydrodynamické ztráty a ztráty třením v úložných částech kola. Díky tomu je obvodová rychlost kola menší než rychlost protékající tekutiny. Zpoždění kola za rychlostí tekutiny není konstantní, ale zvětšuje se s klesající rychlostí protékající tekutiny.



*obr. 6. Radiální lopatkový průtokoměr [3]*

#### 4.2.1.3 Použití axiálních a radiálních průtokoměrů

Tyto přístroje jsou poměrně málo citlivé, protože nejsou schopny zaznamenat malé množství protékající tekutiny, která je potřebná k překonání tření v uložení. Turbínové a lopatkové průtokoměry jsou vhodné pro měření průtoku kapalin i plynů. Nevýhodou je, že je nelze použít u tekutin, které při proudění v potrubí víří, a nejsou doporučovány ani pro tekutiny s velkou viskozitou. Protože turbínové průtokoměry obsahují pohyblivé části, jsou náchylné na opotřebování a na usazování nečistot. Chyby v měření u turbínových průtokoměrů se pohybují v rozmezí 0,1 – 0,5 [%]. Maximální provozní tlak je 200 [MPa] a teplota měřené tekutiny se musí pohybovat v rozmezí od -200 do 200 [°C].

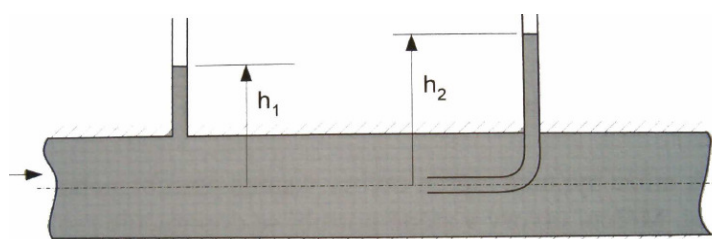
## 4.2.2 Průtokoměry s měřením rozdílu tlaku

Měření na základě diferenčního tlaku je nejrozšířenější metodou v průmyslové výrobě. Jejím prostřednictvím lze měřit průtok agresivních, nebo dvoufázových kapalin, průtok plynů a par za podkritických i nadkritických tlakových poměrů. Pro stanovení rychlosti proudění se využívá princip zachování energie v proudící tekutině formulovaný *Beroulliho* rovnicí.

### 4.2.2.1 Rychlostní sondy

Rychlostní sondy využívají závislosti dynamického tlaku proudícího média na rychlosti proudění. Nejjednodušší rychlostní sondou je Pitotova trubice *obr. 7*.

#### PITOTOVA TRUBICE



*Obr. 7. Pitotova trubice [2]*

Patří k nejstarším a nejjednodušším rychlostním sondám určeným pro měření průtoku tekutiny. Je to trubice zahnutá v pravém úhlu a rovina jejího ústí stojí kolmo k ose proudění. U ústí sondy se zbrzdí rychlost proudění prakticky k nule a veškerá kinetická energie přejde v energii potenciální. Sonda snímá celkový tlak  $p_c$ , který je součtem tlaku statického  $p_s$  a dynamického  $p_d$ . Statický tlak se měří pomocí Piezometrické trubice na okraji potrubí, tj. v jiném místě než se snímá tlak  $p_c$ , což je hlavní nevýhodou Pitotovy trubice. Z předchozí definice platí vztah (13).

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad [Pa] \quad (13)$$

kde:  $p_s$ ... je tlak statický [Pa]

$p_d$ ... je tlak dynamický [Pa]

$p_c$ ... je tlak celkový [Pa]

$v$ ... je střední axiální rychlost tekutiny v potrubí [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$\rho$ ... je hustota protékajícího média [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

a při známé hustotě tekutiny  $\rho$  je rychlost:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (14)$$

## PRANDTLOVA TRUBICE

Prandtlova trubice je zvláštní případ uspořádání Pitotovi trubice, konstrukčně uzpůsobené tak, že měří tlak  $p_c$  i  $p_s$  v jednom místě. Celkový tlak se snímá otvorem v čele sondy a statický tlak je určován štěrbinami ve válcové části sondy.

## KOLENOVÝ PRŮTOKOMĚR

Kolenový průtokoměr je založen na měření rozdílu tlaků, který vzniká při průtoku tekutiny zakřiveným kanálem. Proudí-li plyn nebo kapalina kolenem, zabudovaným v přímém úseku potrubí, pak vlivem působení sil, vyvolaných změnou směru proudu, dochází ke změně v rozložení rychlostí a statických tlaků v radiálním směru zakřivení. Důsledkem toho je zvýšení tlaku na straně většího oblouku a snížení tlaku na straně menšího oblouku v porovnání s tlakem v přímé části potrubí. Tlakový rozdíl mezi určitými body oblouku je funkcí rychlosti proudících částic a tedy funkcí průtoku. Největší tlakový rozdíl je v ose souměrnosti kolena kde se také měří diferenčním tlakoměrem.

Kolenový průtokoměr umožňuje měření i za nepříznivých porovnávacích podmínek (agresivní, nehomogenní, korozivní látky, pěnící kapaliny). Tlaková difference je ve srovnání s klasickými škrtícími orgány menší, menší jsou také i tlakové ztráty na měřidle.

## Použití rychlostních sond

Rychlostní sondy se používají hlavně pro měření průtoků plynů nebo velmi čistých kapalin z důvodu možného zanesení otvorů trubice. Rychlostních sond se používá k různým krátkodobým měřením a hlavně pak k proměřování rychlostních profilů. Typická přesnost měření u těchto měřidel je 2 – 5 [%] z měřené hodnoty. Maximální přípustný tlak u měřené tekutiny je 50 [MPa] a maximální dovolená teplota je 800 [°C].

### 4.2.2.2 Průtokoměry s proměnným průřezem

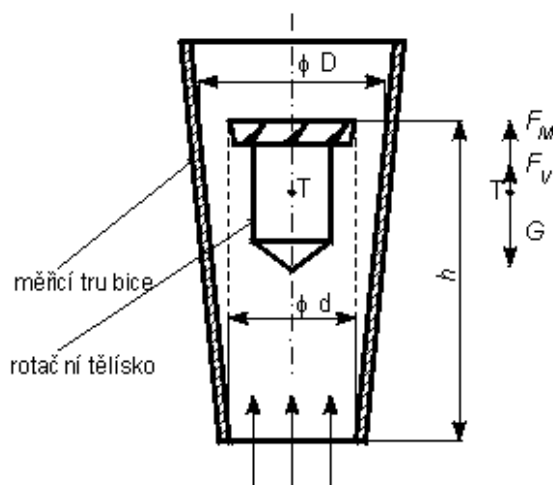
Tato kapitola byla zpracována dle literatury [4].

## ROTOMETRY (PLOVÁČKOVÉ PRŮTOKOMĚRY)

Základem plováčkových průtokoměrů je svislá kuželovitá měřicí trubice, nahoru se rozšiřující *obr. 8*. Tyto trubice jsou zhotoveny ze skla, ale vyrábí se i z kovových a plastových materiálů. V ní se pohybuje plovák z materiálu s hustotou větší než je hustota měřené tekutiny. Pokud tekutina neproudí, je plovák v dolní části trubice. Jakmile začne tekutina proudit směrem vzhůru trubicí, plovák se začne zvedat. Podle velikosti průtoku zaujme rotační těleso vyšší nebo nižší polohu, díky tomu se změní průřez, kterým tekutina protéká. Tlakový spád a rychlost proudu v místě zúžení zůstává konstantní. Měřítkem průtoku je vertikální poloha plováku  $h$ . Na horním okraji plováku jsou šikmé zářezy, které umožňují účinkem proudící tekutiny, uvést plovák do rotačního pohybu, čímž se stabilizuje jeho poloha v trubici.

Při určitém stálém průtoku zaujme plovák určitou polohu a v té setrvává tak dlouho, dokud se průtok nezmění. Za tohoto stavu jsou v rovnováze všechny síly, působící na plovák. Směrem dolů působí tíha plováku  $F_G$ . Směrem vzhůru působí vztlak  $F_V$  a síla proudícího média  $F_M$ . Síla proudícího média se skládá ze síly tlakové a třecí. Na velikost tlakové a třecí síly má vliv způsob obtékání plováku. Způsob obtékání je možné měnit tvarem plováku.

Tvary plováku mohou být různé a řídí se účelem použití. Poloha plováku se zjišťuje přímo na stupnici, která je na průhledné měřicí trubici průtokoměru, nebo lze snímat také magneticky, pneumaticky a fotoelektricky.



Obr. 8. Schéma rotametru [4]

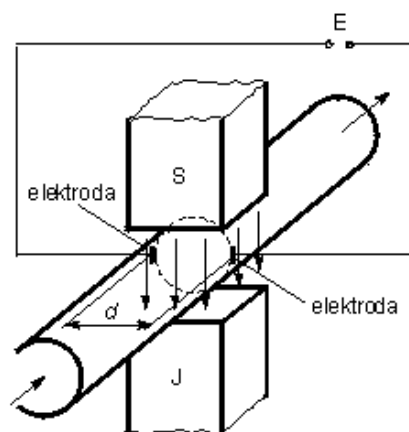
## POUŽITÍ PLOVÁČKOVÝCH PRŮTOKOMĚŘŮ

Plováčkové průtokoměry jsou jednoduché, spolehlivé a relativně levné snímače. Mají velký měřicí rozsah, malou tlakovou ztrátu, snadno se instalují a jsou schopny měřit i malé průtoky. Používají se k měření průtoků homogenních tekutin s nejrůznějšími fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Využívají se při měření v potrubích s průměrem do 100 [mm]. Vyrábějí se s měřicími rozsahy pro měření průtoku vody od 0,0001 do 75 [m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>], nebo vzduchu od 0,007 do 3000 [m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>]. Vyskytuje se u nich chyba v měření 1 – 4 [%] z měřicího rozsahu.

### 4.3 Elektromagnetické indukční průtokoměry

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [4].

Indukční průtokoměry jsou založeny na principu Faradayova zákona o elektromagnetické indukci při pohybu vodiče v magnetickém poli. Pohybem vodiče v homogenním magnetickém poli se indukuje elektrické napětí. Permanentní magnet nebo elektromagnet vytváří magnetické pole, které prochází potrubím i kapalinou. Úsek potrubí mezi póly magnetu musí být z neferomagnetického materiálu. Na vnitřním průměru trubky jsou zabudovány, kolmo na směr magnetických siločar, dvě elektrody pro snímání indukovaného napětí obr. 9.



Obr. 9. Indukční průtokoměr [4]

Trubky u tohoto měřidla bývají vyrobeny z legovaných ocelí o vysoké pevnosti, aby jejich stěny byly pokud možno co nejtenčí. Vnitřní stěna měřicí trubky bývá pokryta elektricky nevodivou vrstvou měkkého nebo tvrdého pryže, teflonu, či smaltu. Indukční průtokoměry se vyrábějí s průměrem od 2 [mm] do 2 [m].

Napájení magnetického obvodu může být stejnosměrné, střídavé nebo pulzní. Pro různé průměry měřicí trubky se používají různé konstrukce elektromagnetu. Indukční měření průtoku je vhodné pro všechny vodivé kapaliny včetně obtížně měřitelných kapalin, jako jsou silně viskózní látky, kaly, kapaliny s vysokým obsahem sedimentačních částic, které jsou klasickými metodami prakticky neměřitelné. Indukční metoda je velmi vhodná pro měření průtoku tekutých kovů. Měřená kapalina může obsahovat i pevné nemagnetické částice nebo bublinky vzduchu. Pokud jsou rovnoměrně rozptýleny a nevytvářejí spojitou izolující oblast, nepůsobí rušivě na údaj měřidla. Chyby mohou vznikat při neúplném zaplnění měřicího prostoru, za přítomnosti velkých bublin plynů a při malých rychlostech proudění. Výstupní signál je lineární funkcí průtoku. Měřicí rozsahy jsou v rozmezí 9 až 24000 [m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>], rozsahy rychlostí 0,5 až 50 [m·s<sup>-1</sup>]. Měřidlo nevykazuje prakticky žádnou tlakovou ztrátu, protože průtočný průřez se nemění a do proudu nezasahují žádné mechanické části. Výhodou je i to, že neobsahuje žádné pohyblivé součásti. Signál není citlivý na změny hustoty, viskozity a tlaku. Rovněž vliv teploty je prakticky zanedbatelný, protože u většiny kapalin elektrická vodivost roste s teplotou. Teplota je tedy rozhodující jen při stanovení dolního limitu vodivosti.

Přístroje je možno zabudovat do potrubí v libovolné poloze bez ohledu na neustálené proudění, za koleno, za regulační orgán apod. Průtočný průřez však musí být zcela zaplněn, protože signál je úměrný rychlosti průtoku a objemový průtok se vyhodnocuje ze součinu rychlosti a průtočného průřezu.

## 4.4 Ultrazvukové průtokoměry

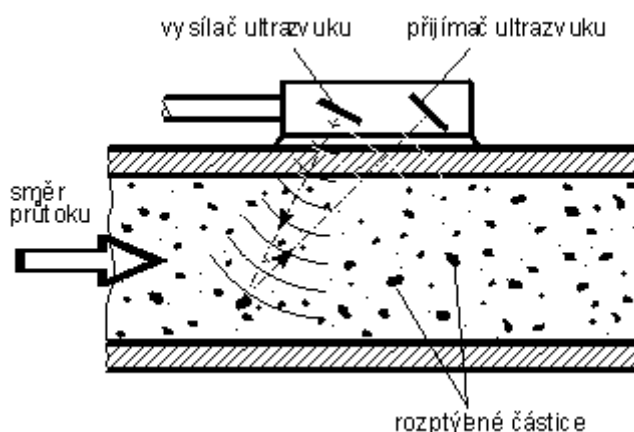
Tato kapitola byla zpracována dle literatury [4], [2].

Ultrazvukové průtokoměry můžeme rozdělit do dvou skupin:

- průtokoměry využívající Dopplerova jevu
- průtokoměry, u nichž se měří doba průchodu ultrazvukového signálu

### 4.4.1 Průtokoměry založené na Dopplerově jevu

Lze je použít v případě, že proudící médium obsahuje částice odrážející zvuk, tj. např. pevné částice či bubliny vzduchu. Bez těchto částic nemůže průtokoměr tohoto typu pracovat. Průtokoměr se skládá z vysílače a přijímače ultrazvuku, které jsou připevněny na jedné straně potrubí *obr. 10*.



*Obr. 10. Průtokoměr založený na Dopplerově jevu [4]*

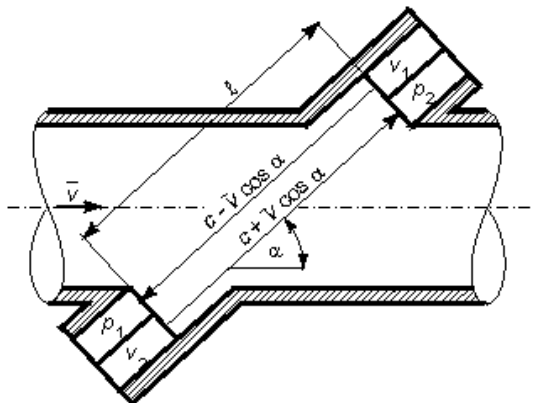
Přístroje, které využívají Dopplerova principu, vysílají do tekutiny ultrazvukové vlny s konstantní frekvencí a přijímají vlnění odražené od pevných částic nebo od bublin rozptýlených v tekutině. Vzhledem k pohybu částic nebo bublin tekutinou, je frekvence přijatého ultrazvukového vlnění odlišná od frekvence vyslané vlny. Rozptyl frekvencí je pak úměrný rychlosti proudění tekutiny. Přesnost měření závisí na profilu proudícího média, na obsahu a velikosti částic i velikosti potrubí. Kalibrací je možno docílit přesnosti  $\pm 1$  [%].

Přístroje se vyrábějí i v přenosném provedení a v tomto případě se měřicí zařízení připevňuje jednoduchým způsobem vně potrubí. Ultrazvukové průtokoměry tohoto typu neovlivňují měrný průtok, protože nezasahují do proudícího média a s výhodou jich lze využít k měření průtoku kalů a znečištěných tekutin, které způsobují těžkosti běžným průtokoměrům.



#### 4.4.2 Průtokoměry s měřenou dobou průchodu signálu

Konstruují se nejčastěji v diferenčním zapojení. Tyto průtokoměry se skládají ze dvou vysílačů a přijímacích jednotek. Ultrazvukový signál se vysílá jednak ve směru proudění a jednak proti směru proudění ve formě impulsů a vyhodnocují se časové rozdíly při průchodu impulsů v obou směrech šíření *obr. 11*.



Obr. 11. Ultrazvukový průtokoměr [4]

Vysílač  $V_1$  vysílá impulsy ve směru proudění, vysílač  $V_2$  proti směru proudění. Ultrazvukový impuls vyslaný vysílačem  $V_1$  se šíří rychlostí  $c + v \cdot \cos \alpha$ . Časový interval mezi vysláním vysílačem  $V_1$  a příjmem impulsu přijímačem  $P_1$  bude (15).

$$t_1 = \frac{l}{c + \bar{v} \cdot \cos \alpha} \quad [s] \quad (15)$$

kde:  $l$ ... je vzdálenost mezi jednotlivými vysílači a přijímači [mm]

$c$ ... je rychlost šíření ultrazvukového signálu v daném prostředí [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$\bar{v}$ ... je střední rychlost proudícího média [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$\alpha$ ... je úhel, který svírá vysílaný signál s osou potrubí [ $^\circ$ ]

Pro druhou dvojici vysílače  $V_2$  a přijímače  $P_2$  bude platit:

$$t_2 = \frac{l}{c - \bar{v} \cdot \cos \alpha} \quad [s] \quad (16)$$

Pro rozdíl časových intervalů jde odvodit vztah:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{c - \bar{v} \cdot \cos \alpha} - \frac{l}{c + \bar{v} \cdot \cos \alpha} \quad [s] \quad (17)$$

Po úpravě vztahu (17) bude rovnice:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot l \cdot \bar{v} \cdot \cos \alpha}{c^2 - \bar{v}^2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad [s] \quad (18)$$

Vzhledem k tomu, že při měření průtoku platí, že  $v^2 \ll c^2$ , můžeme vztah (18) zjednodušit a upravit do tvaru:

$$\bar{v} = \frac{c^2 \cdot \Delta t}{2 \cdot l \cdot \cos \alpha} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (19)$$

Pro rychlost šíření ultrazvuku můžeme psát:

$$c = \frac{2 \cdot l}{t_1 + t_2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (20)$$

Po dosazení vztahu (20) do vztahu (19) dostaneme výsledný vztah:

$$\bar{v} = \frac{2 \cdot l \cdot \Delta t}{(t_1 + t_2)^2 \cdot \cos \alpha} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (21)$$

Vztah pro objemový průtok:

$$Q_v = \frac{l \cdot \Delta t \cdot \pi \cdot D^2}{(t_1 + t_2)^2 \cdot \cos \alpha \cdot 2} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (22)$$

kde:  $D \dots$  je vnitřní průměr potrubí [m]

Zdroj ultrazvukových vln (elektroakustický měnič) může být v těsném styku s měřenou kapalinou a pak se jedná o dotykové měření, nebo je nasazen na potrubí z vnějšku (bezdotykové měření). Ultrazvukové průtokoměry jsou náročné na technické provedení a rovněž jejich kalibrace je obtížná. Velkou výhodou je to, že nezasahují do proudícího média a dají se zabudovat dodatečně na povrch potrubí.

Ultrazvukových metod lze použít i pro měření pulzujících průtoků, měření kapalin s obsahem kalů, tavením za vysokých teplot. Je to jedna z mála metod (vedle indukčních průtokoměrů) pro měření průtoku tekutých kovů, požívaných k přenosu tepla v jaderné energetice.

## 4.5 Vírové průtokoměry

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [4], [2].

U vírového průtokoměru se využívá tvorby tzv. Karmínových vírů, které vznikají při obtékání tekutiny kolem tělesa neaerodynamického tvaru, umístěného kolmo na směr proudění. Víry vznikají střídavě z jedné a druhé strany přepážky.

Různé typy vírových průtokoměrů se liší hlavně velikostí a tvarem vloženého tělesa, místem a principem snímání frekvence vzniklých vírů. Měřícím místem snímání frekvence vírů bývá vložené těleso nebo stěna potrubí, popř. jiná místa ve vírové oblasti. Pro snímání frekvence vírů se využívá vysokofrekvenčních snímačů (vyhřívané termistory, ultrazvuk, kapacitní diferenční snímač, piezoelektrické a tenzometrické snímače). Tvar obtékaného tělesa má rozhodující vliv na stabilitu periodického snímání vírů.

Vírové průtokoměry mají celou řadu předností: neobsahují pohyblivé součásti a poskytují lineární výstup v širokém rozmezí průtoku 2 až 100 [%]. Jsou relativně necitlivé na změnu teploty, tlaku nebo hustoty měřeného média. Předností je rovněž, že měřenosnou veličinou výstupního signálu je frekvence, což je výhodné při číslicovém zpracování signálu. Jejich nevýhodou je, že vykazují trvalou tlakovou ztrátu a nelze je použít pro měření malých průtoků (podmínkou je turbulentní charakter proudění). Vírové průtokoměry nacházejí v současné době značné uplatnění a slouží zejména jako náhrada klasických průřezových měřidel. Obecně jsou určeny pro měření relativně čistých kapalin, plynů a par, obsahujících pouze minimální množství pevných znečišťujících látek.

## 5 PRŮŘEZOVÁ MĚŘIDLA

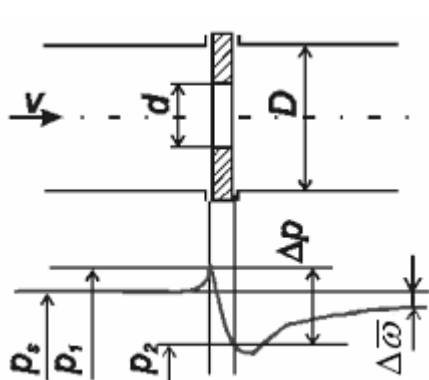
Řadí se pod průtokoměry s měřením rozdílu tlaku. Základní skupinou těchto průtokoměrů jsou škrticí orgány. Princip měření využívá jevu, ke kterému dochází při zúžení průtočného průřezu. Do potrubí se umístí škrticí orgán zužující průtočnou plochu. Rozdíl statických tlaků, snímáný diferenčním tlakoměrem před a za zúžením, je závislý na velikosti průtoku. Tyto měřidla neobsahují žádné mechanické rotační díly.

Měření průtoku škrticími orgány patřilo mezi nejčastěji používanou provozní metodu pro měření průtoku kapalin i plynů ve velmi širokém rozmezí teplot a tlaků. V současné době se často místo průřezových měřidel užívá moderních metod s přímým elektrickým výstupem (např. průtokoměry indukční, ultrazvukové, vírové).

Jako škrticí orgán se využívají clony, dýzy, Venturiho dýzy a Venturiho trubice. Jednotlivé škrticí orgány jsou normalizovány [5], [6], [7]. Parazitní vliv na měření má změna váhy kapaliny, viskozity, změna teploty a tlaku. Každý typ průtokoměrů je určen vždy pro určitou tekutinu. Při použití jiné tekutiny je třeba volit jiný škrticí orgán a průtokoměr přecejchovat.

Při měření průtoku škrticími orgány musí být splněny určité pracovní podmínky. Měřená látka musí být homogenní, musí mít stálou teplotu a musí být tvořena jednou fází. Kapalina nesmí obsahovat tuhé částice ani bublinky plynu, plyn nesmí obsahovat tuhé částice ani kapky. Potrubí, ve kterém je škrticí orgán musí být kruhového průřezu o průměru větším než 50 [mm]. Potrubí musí být přímé v určité délce před i za měřidlem a nesmí v něm být umístěny žádné překážky rušící proudění. Potrubí musí být uvnitř hladké nebo musí mít drsnost získanou při výrobě. Tekutina musí trvale vyplňovat celý prostor potrubí, škrcením nesmí nastat fázová přeměna. Proudění musí být ustálené bez rázů, rychlost se může měnit jen zvolna. [4]

### 5.1 Tlakové poměry v okolí škrticího orgánu



$v$ ...rychlost proudění [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$d$ ...průměr otvoru škrticího orgánu (na obrázku je uvedena normalizovaná dýza) [mm]

$D$ ...průměr potrubí [mm]

$p_s$ ...vstupní statický tlak [Pa]

$p_1$ ...snímaný tlak před škrticím orgánem [Pa]

$p_2$ ...snímaný tlak za škrticím orgánem [Pa]

$\Delta p$ ...diferenční tlak ( $p_1 - p_2$ ) [Pa]

$\Delta \bar{p}$ ...trvalá tlaková ztráta [Pa]

Obr. 12. Tlakové poměry v okolí škrticího orgánu [2]

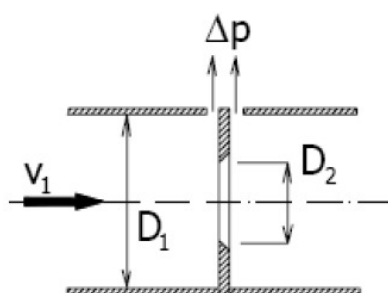
## 5.2 Porovnání jednotlivých škrticích orgánů na základě trvalé tlakové ztráty

Tlaková ztráta u měřidel, vzniká třením a vířením před a za měřidlem a je vždy menší než měřená difference tlaku na škrticím orgánu. Venturiho trubice má nejmenší trvalou tlakovou ztrátu ze všech škrticích orgánů. Je tomu taky proto, že u Venturiho trubice netvoří tekutina žádné víry před škrticím orgánem ani za ním. Její velikost zřídka přesáhne 10 [%] z měřeného rozdílu tlaku. Dýza je kompromis mezi Venturiho trubicí a clonou. Má větší trvalou tlakovou ztrátu než Venturiho trubice, ale menší než clona. Clona má největší trvalou tlakovou ztrátu v porovnání se všemi škrticími orgány.

## 5.3 Clona

Nejjednodušším a nečastěji používaným škrticím orgánem pro kruhová potrubí je clona *obr. 13*. Slouží ke zmenšení průřezu potrubí. Požadavky na přesnost provedení clony jsou vysoké. Je to v podstatě plochá kovová deska s otvorem, která je vložena do potrubí kolmo na směr proudění tekutiny. Průměr škrticího otvoru a jeho umístění závisí na typu měřené tekutiny. Odběry statických tlaků jsou prováděny těsně před a za deskou, kdy existují dva základní typy odběru – koutové odběry a přírubové odběry.

Průtokoměry se škrticí clonou jsou robustní a i při velkých průměrech jsou relativně levné. Clonou lze měřit průtok většiny čistých tekutin. Jsou však náchylné vůči opotřebení, které může být způsobeno znečištěným médiem nebo médiem s částicemi. To může ovlivnit tlakovou diferencii odpovídající určitému průtoku. Aby se dosáhlo požadovaných vlastností, musí být clona zabudována do přímého úseku potrubí s předem definovanými uklidňujícími úseky před a za clonou (uklidňující potrubí před a za průtokoměrem je udáváno u všech typů průtokoměrů, ovšem u normalizované clony bývají tyto úseky jedny z nejdelších). [2]

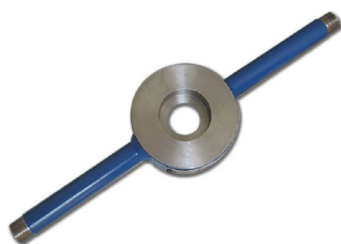


Obr. 13. Schéma clony [2]

### 5.3.1 Základní druhy clon

- a) **centrická clona s obvodovými odběry tlakové difference** *obr. 14*
- b) **clona víceotvorová** *obr. 15*. Postačuje jí menší délka přímého úseku potrubí.
- c) **excentrická clona** *obr. 16*. Slouží pro měření znečištěných tekutin. Umožňuje proudění nečistot obsažených v tekutině a z tohoto důvodu se umísťuje do vodorovných, eventuelně šikmých úseku potrubí.

- d) **přestavitelná segmentová clona.** Používá se např. pro předávací stanice plynu s nepřetržitým provozem. Umožňuje měnit rozsah měřených průtoků změnou průtočného průřezu za provozu (změnou hloubky zasunutí segmentu). Tím se průběžně mění vztah mezi tlakovou diferencí a průtokem.
- e) **clona kuželová.** Pro měření viskózních tekutin (olejů). Je to obdoba klasické clony s tím rozdílem, že vstup měřicího otvoru je kuželovitě zakloněn.
- d) **clona čtvrtkruhová.** Je také určena pro měření viskózních tekutin. Je to obdoba klasické clony s tím rozdílem, že vstup měřicího otvoru má zaoblení ve tvaru čtvrtkružnice.



Obr. 14. Centrická clona [8]



Obr. 15. Víceotvorová clona [8]



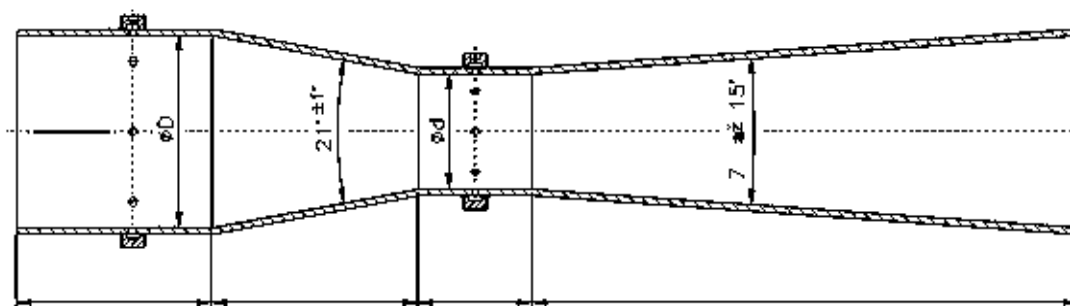
Obr. 16. Excentrická clona [8]



Obr. 17. Odběrové příruby s centrickou clonou [8]

## 5.4 Venturiho trubice

U Venturiho trubice *obr. 18* je tekutina zrychlena v kuželovém konfuzoru, což opět vyvolá místní pokles statického tlaku a nárůst rychlosti proudící tekutiny. V následující části difuzoru, se tlak téměř vrací na úroveň tlaku před zúžením. Nevýhodou je poměrně vysoká cena a malá přesnost měření, proto se Venturiho trubice využívá velmi málo.



Obr. 18. Schéma Venturiho trubice [2]



*Obr. 19. Venturiho trubice [8]*

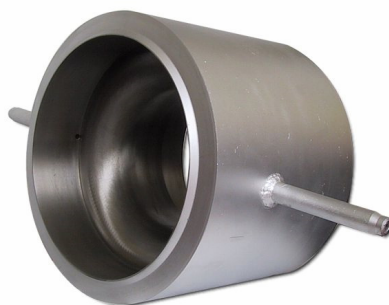
## 5.5 Dýza

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [8].

Dýzy jsou speciální měřiče průtoku, které vzhledem ke své konstrukci lépe odolávají dlouhodobému namáhání vysokými teplotami a tlakem (vysokotlaká pára, napájecí voda). Výhodnost využití dýz je zejména na vysokotlaké straně kotelních systémů a rozvodů. Konstrukčně existují dva typy normalizovaných dýz – dýza ISA 1932 a dýza s dlouhým poloměrem. Dýza je do potrubního řádu ve většině případů vevařena svarovými spoji nebo je vsazena mezi příruby.

Součástí vevařované dýzy jsou krátké uklidňující délky potrubí (minimálně  $2D$  před dýzou). Výhodou svarového vsazení je materiálová úspora na přírubách a následně také minimalizace netěsnosti v přírubovém spoji. Odběry diferenčního tlaku jsou buď koutové nebo bodové *obr. 20*. Pracovní poloha průtokoměru může být vodorovná nebo svislá.

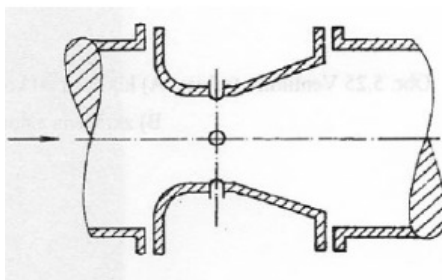
Její tvar je složitější než u clony, proto se taky méně používá. Dýza na rozdíl od Venturiho trubice neobsahuje difuzor, ale pouze konfuzor. Dýzy umožňují měřit větší průtok než clony a také umožňují měřit průtok u tekutin, které obsahují větší pevné částice. Nejistota při měření dýzou se pohybuje okolo 1 [%] a kalibrací lze dosáhnout nejistoty pouze 0,25 [%]. Dýzy jsou levnější než Venturiho trubice a jsou více přesné.



*Obr. 20. Dýza [8]*

### 5.5.1 Základní typy dýz

- a) **normovaná dýza** Je vhodná pro měření průtoku páry o vysokých tlacích ( $p > 10 \text{ MPa}$ ) a teplotách, které přicházejí v úvahu v moderních elektrárnách.
- b) **normovaná Venturiho dýza** Používá se hlavně v provozech, kde je hlavním požadavkem malá hodnota trvalé tlakové ztráty. Vznikne připojením difuzoru na normalizovanou dýzu *obr. 21*. Podle provedení se Venturiho dýzy dělí na normální, které mají průměr difuzoru shodný s průměrem potrubí a zkrácené, které mají menší konečný průměr difuzoru, než má průměr potrubí.



Obr. 21. Schéma Venturiho dýzy [2]

- c) **čtvrtkruhová dýza** Je vhodná pro měření viskózních kapalin nebo kapalin proudících malou rychlostí. Tento škrticí orgán je vhodný pro měření průtoku znečištěných topných olejů.
- d) **eliptická dýza** Jedná se o velice specializovaný výrobek s vysokými požadavky na přesnost provedení jak výpočtu, tak samotného výrobku. Odběry diferenčního tlaku jsou umístěny v hrdle dýzy. Používají se jako zkušební měřidlo při výkonové přejímací zkoušce parních turbín.

## 6 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRŮTOKOMĚŘŮ

Tato kapitola byla zpracována dle literatury [2]

| Průtokoměr                     | Rozsah<br>( $Q_{\max}$ :<br>$Q_{\min}$ ) | Plyny,<br>páry |   | Kapaliny |   |   |   | Teplota<br>[°C] | Tlak<br>[MPa] | Přesnost<br>(z měřené<br>hodnoty) | Tlaková<br>ztráta |
|--------------------------------|--|----------------|---|----------|---|---|---|-----------------|---------------|-----------------------------------|-------------------|
|                                |  | A              | B | A        | B | C | D |                 |               |                                   |                   |
| Normalizovaná clona            | 4:1                                      | x              | - | x        | o | - | o | do 540          | do 41         | 1-2 %                             | velká             |
| Excentrická clona              | 4:1                                      | o              | x | o        | x | - | o | do 540          | do 41         | 2 %                               | velká             |
| Segmentová clona               | 4:1                                      | o              | x | o        | x | - | o | do 540          | do 41         | 2 %                               | velká             |
| Venturiho trubice              | 4:1                                      | x              | o | x        | o | o | o | do 540          | do 41         | 1-2 %                             | střední           |
| Dýza                           | 4:1                                      | x              | o | x        | o | o | o | do 540          | do 41         | 1-2 %                             | velká             |
| Pitotova trubice               | 3:1                                      | x              | - | x        | - | o | o | do 540          | do 41         | 5 %                               | malá              |
| Kolenový                       | 3:1                                      | x              | o | x        | o | - | o | do 540          | do 41         | 5 %                               | malá              |
| Annubar                        | 10:1                                     | x              | o | x        | - | o | o | do 540          | do 41         | 1.5 %                             | malá              |
| Plováčkový skleněný            | 10:1                                     | x              | - | x        | - | x | o | do 120          | do 3          | 1 %                               | střední           |
| Elektromagnetický              | 30:1                                     | -              | - | x        | x | x | x | do 180          | do 10,5       | 1 %                               | -                 |
| Vírový                         | 20:1                                     | x              | o | x        | o | - | o | do 430          | do 10,5       | 1,5 %                             | střední           |
| Turbínový                      | 10:1                                     | x              | - | x        | - | o | o | do 500          | do 43         | 0,5 %                             | velká             |
| Ultrazvukový (Dopplerův efekt) | 30:1                                     | -              | x | -        | x | o | x | do 300          | do 10         | 5 %                               | -                 |
| Coriolisův                     | 80:1                                     | o              | - | x        | x | x | o | do 200          | do 10         | 0,2 %                             | malá              |
| Termoanemometr                 | 50:1                                     | x              | - | o        | - | - | - | do 65           | do 31         | 1 %                               | malá              |
| Dávkovací průtokoměry          | 10:1                                     | -              | - | x        | - | o | - | do 250          | do 10         | 1 %                               | střední až velká  |

Tabulka 1. Porovnání jednotlivých průtokoměrů

Poznámka: **A** = čistá tekutina, **B** = znečištěná tekutina, **C** = viskózní tekutina, **D** = korozivní tekutina, **x** = průtokoměr je přímo určen pro daný typ tekutiny, **o** = průtokoměr lze použít pro tento typ tekutiny, **-** = průtokoměr není určen pro tuto tekutinu.



## 7 NÁVRH MĚŘENÍ PRŮTOKU POMOCÍ DÝZ

Tato kapitola se zabývá návrhem měření průtoku napájecí vody a přehřáté páry pomocí dýz pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy.

Pracovní parametry:

| Veličina                    | Značka     | Jednotka         | Napájecí voda          | Přehřátá pára          |
|-----------------------------|------------|------------------|------------------------|------------------------|
| statický tlak před dýzou    | $p_1$      | Mpa              | 22                     | 18,1                   |
| teplota proudícího média    | $t_1$      | °C               | 249                    | 575                    |
| průměr potrubí při 20°C     | $D_{20}$   | mm               | 267,9                  | 213                    |
| průměr dýzy při 20°C        | $d_{20}$   | mm               | musím zjistit          | musím zjistit          |
| teplotní roztažnost dýzy    | $\alpha_d$ | $1 \cdot K^{-1}$ | $13,145 \cdot 10^{-6}$ | $14,626 \cdot 10^{-6}$ |
| teplotní roztažnost potrubí | $\alpha_D$ | $1 \cdot K^{-1}$ | $13,145 \cdot 10^{-6}$ | $14,626 \cdot 10^{-6}$ |
| hmotnostní průtok           | $q_m$      | $t \cdot h^{-1}$ | 560                    | 300                    |
| diferenční tlak             | $\Delta p$ | kPa              | 60                     | 350                    |

Tabulka 2. Pracovní parametry pro návrh měření průtoku pomocí dýz

Výpočet byl proveden pro pracovní parametry, které jsou zadané v tabulce 2 dle literatury [6] a hlavním úkolem bylo zjistit průměr dýzy při 20 [°C] a hodnotu trvalé tlakové ztráty.

### 7.1 Princip metody měření a výpočet

Princip metody měření spočívá v zabudování dýzy nebo Venturiho dýzy do potrubí, v němž plným průřezem protéká tekutina. Zabudování primárního prvku způsobí rozdíl statických tlaků mezi přední stranou a hrdlem. Průtok může být stanoven z naměřených hodnot tohoto tlakového rozdílu a ze znalosti vlastností proudící tekutiny, jakož i z okolností, za nichž je prvek použit. Předpokládá se, že prvek je geometricky podobný prvku, který byl kalibrován a že podmínky použití jsou stejné, tj. ve shodě s normou [6].

### 7.2 Návrh měření průtoku napájecí vody

Byla zvolena dýza ISA 1932. Část dýzy uvnitř potrubí je kruhová. Dýza se skládá z konfuzoru se zaobleným profilem a z válcovitého hrdla.

Výpočet byl proveden pro 110 [%] a 40 [%] hmotnostní průtok napájecí vody  $q_m$  dle pracovních parametrů a zároveň bylo počítáno se dvěmi hodnotami diferenčního tlaku  $\Delta p = 60$  [kPa] a 350 [kPa].

### 7.2.1 Meze použití dýzy ISA 1932

Požítí tohoto typu dýzy musí vyhovovat normě [6], když:

- $50 \text{ mm} \leq D \leq 500 \text{ mm}$
- $0,3 \leq \beta \leq 0,8$

a když  $Re_D$  je v následujících mezích:

- pro  $0,30 \leq \beta < 0,44$   $7 \times 10^4 \leq Re_D \leq 10^7$
- pro  $0,44 \leq \beta \leq 0,80$   $2 \times 10^4 \leq Re_D \leq 10^7$

### 7.2.2 Postup výpočtu

Výpočet byl proveden v programu Engineering Equation Solver dále už jen EES, který po zadání následujících vzorců a po provedení iteračního výpočtu dospěl k řešení.

- Přepočet vnitřního průměru potrubí v závislosti na teplotě:

$$D = D_{20} \cdot (1 + \alpha_D \cdot \Delta t) \quad [mm] \quad (23)$$

$$\Delta t = t_1 - 20 \quad [^\circ C] \quad (24)$$

kde:  $D_{20}...$  je průměr potrubí při  $20 \text{ }^\circ C$  [mm]

$\alpha_D...$  je teplotní roztažnost potrubí [ $1 \cdot K^{-1}$ ]

$t_1...$  je teplota proudícího média [ $^\circ C$ ]

- Přepočet průměru otvoru dýzy v závislosti na teplotě:

$$d = d_{20} \cdot (1 + \alpha_d \cdot \Delta t) \quad [mm] \quad (25)$$

kde:  $d_{20}...$  je průměr dýzy při  $20 \text{ }^\circ C$  [mm]

$\alpha_d...$  je teplotní roztažnost dýzy [ $1 \cdot K^{-1}$ ]

$\Delta t...$  je rozdíl teploty proudícího média a teploty okolí. Určí se dle vztahu (24)

- Poměr průměrů dýzy a potrubí:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad [1] \quad (26)$$

kde:  $d...$  je průměr dýzy v závislosti na teplotě ze vztahu (25)

$D...$  je průměr potrubí v závislosti na teplotě ze vztahu (23)

- Hustota tekutiny (proudícího média):

$$\rho = f(t_1, p_1) \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (27)$$

kde:  $t_1...$  je teplota proudícího média [ $^\circ C$ ]

$p_1...$  je statický tlak před dýzou [kPa]

- Viskozita tekutiny (proudícího média):

$$\mu = f(t_1, p_1) \quad [Pa \cdot s] \quad (28)$$

kde:  $t_1...$  je teplota proudícího média [ $^\circ C$ ]

$p_1...$  je statický tlak před dýzou [kPa]

- Reynoldsovo číslo vztažené k průměru potrubí  $D$ :

$$Re_D = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu \cdot \frac{D}{1000}} \quad [1] \quad (29)$$

kde:  $q_m \dots$  je hmotností průtok ze vztahu (32)

$D \dots$  je průměr potrubí v závislosti na tetě ze vztahu (23)

$\mu \dots$  je viskozita tekutiny ze vztahu (28)

- Součinitel průtoku:

$$C = 0,99 - 0,2262 \cdot \beta^{4,1} - (0,00175 \cdot \beta^2 - 0,0033 \cdot \beta^{4,15}) \cdot \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{1,15} \quad [1] \quad (30)$$

kde:  $\beta \dots$  je poměr průměru dýzy a potrubí ze vztahu (26)

$Re_D \dots$  je Reynoldsovo číslo vztažené k průměru potrubí  $D$  ze vztahu (29)

- Nejistota součinitele průtoku  $\psi_C$ :

Za předpokladu, že  $\beta$ ,  $D$ ,  $Re_D$  a  $Ra/D$  jsou známy bez chyby, relativní nejistota hodnoty  $C$  se rovná:

- 0,8 % pro  $\beta \leq 0,6$
- $(2 \cdot \beta - 0,4)$  % pro  $\beta > 0,6$

- Součinitel expanze:

$$\varepsilon = 1 \quad [1] \quad (31)$$

Pro vodu v kapalně formě je součinitel expanze vždy roven 1.

- Hmotnostní průtok:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{d}{1000} \right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot 1000 \cdot \rho} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (32)$$

kde:  $C \dots$  je součinitel průtoku ze vztahu (30)

$\beta \dots$  je poměr průměru dýzy a potrubí ze vztahu (26)

$d \dots$  je průměr dýzy v závislosti na teplotě ze vztahu (25)

$\Delta p \dots$  je diferenční tlak [kPa]

$\rho \dots$  je hustota tekutiny ze vztahu (27)

- Objemový průtok:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (33)$$

kde:  $q_m \dots$  je hmotností průtok ze vztahu (32)

$\rho \dots$  je hustota tekutiny ze vztahu (27)

- Tlaková ztráta dýzy ISA je přibližně závislá na diferenčním tlaku  $\Delta p$  podle rovnice (34).

$$\Delta \tilde{\omega} = \frac{\sqrt{1-\beta^4} \cdot (1-C^2) - C \cdot \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4} \cdot (1-C^2) + C \cdot \beta^2} \cdot \Delta p \quad [kPa] \quad (34)$$

kde:  $\beta \dots$  je poměr průměru dýzy a potrubí ze vztahu (26)

$C \dots$  je součinitel průtoku ze vztahu (30)

$\Delta p \dots$  je diferenční tlak [kPa]

Podle tlakové ztráty se porovnává ekonomická výhodnost použití jednotlivých škrticích orgánů. Čím je tato tlaková ztráta menší, tím bude výhodnější použít daný škrticí orgán. Tato tlaková ztráta je rozdíl statického tlaku mezi tlakem měřeným u stěny na přední straně primárního prvku v průřezu, kde vliv dynamického tlaku na primární prvek je ještě zanedbatelný (přibližně  $D$  před primárním prvkem) a tlakem měřeným za primárním prvkem v místě, kde obnova statického tlaku expanzí proudu smí být považována již za úplnou (přibližně  $6D$  za primárním prvkem).

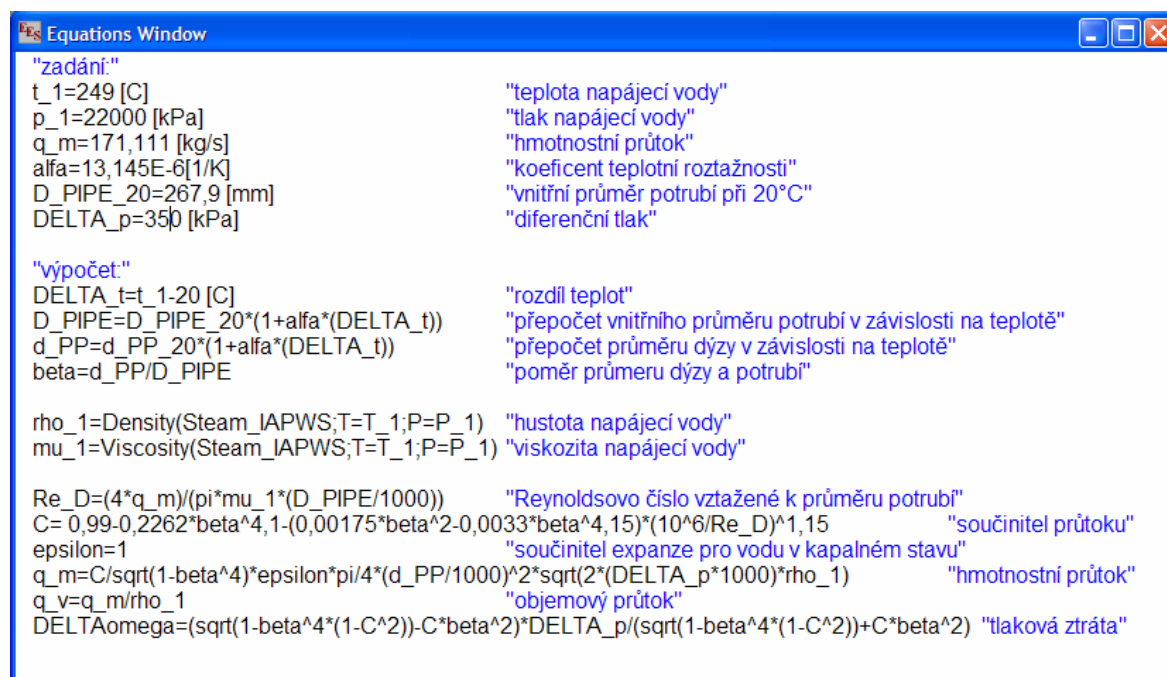
### 7.2.2.1 Výpočet v EES

Výpočet byl proveden pro 110 [%] průtoku napájecí vody, kvůli maximálnímu výkonu kotle.

Výpočetní parametry (včetně pracovních parametrů, které jsou v *tabulce 2*):

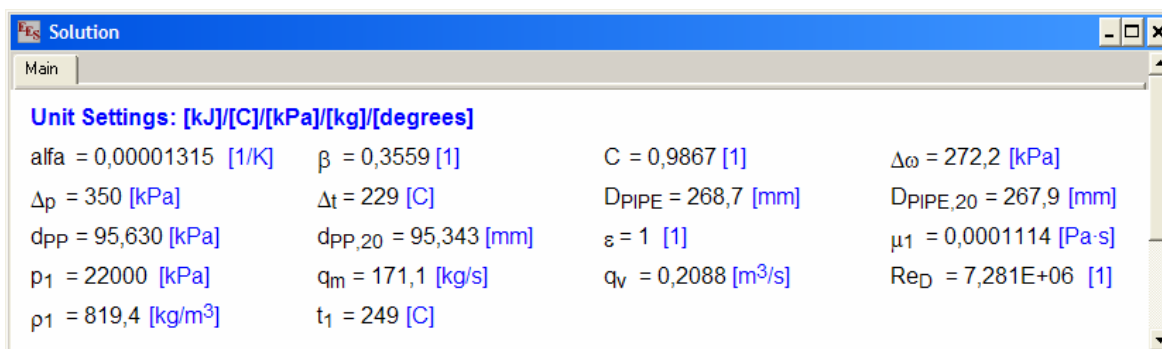
- 110 [%] průtok:  $q_m = 171,111 \text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}]$ ,  $\Delta p = 350 \text{ [kPa]}$
- 110 [%] průtok:  $q_m = 171,111 \text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}]$ ,  $\Delta p = 60 \text{ [kPa]}$

Výpočetní kód zapsaný v programu EES, je zobrazený na *obr. 22*. Tento obrázek představuje výpočet s výpočetními parametry a).



Obr. 22. Equations Window z programu EES pro napájecí vodu

Výpis výsledků v EES je zobrazený na obr. 23.



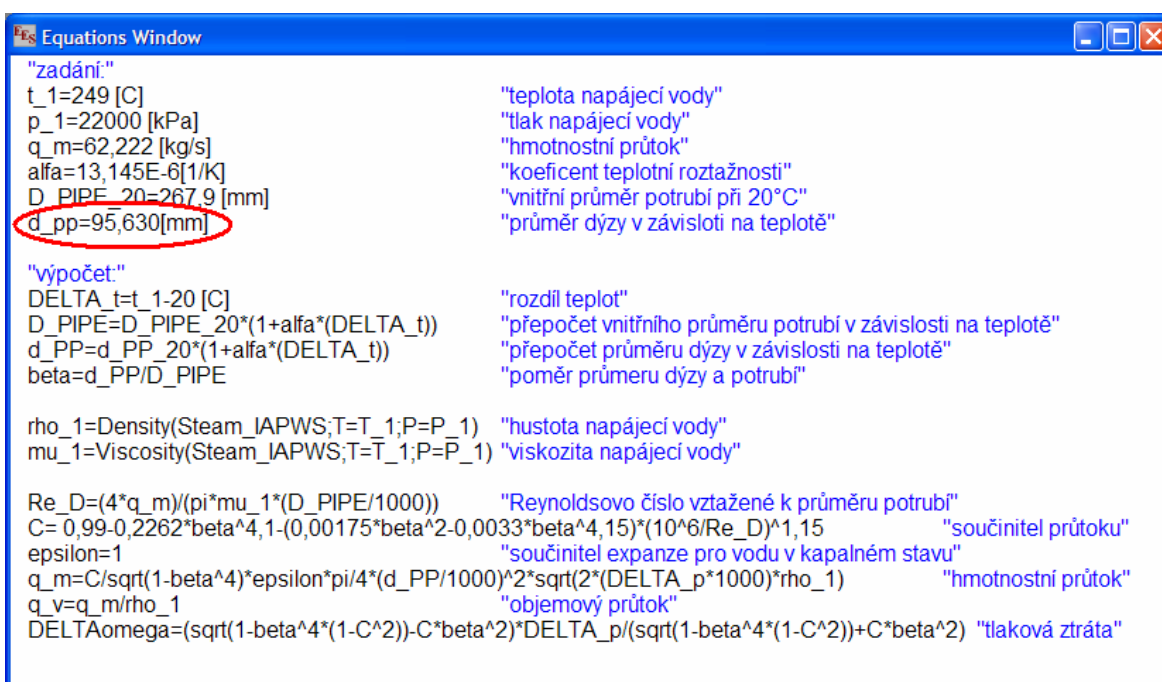
Obr. 23. Solution z programu EES pro napájecí vodu

Aby se mohl určit rozsah snímače, kterým se bude diferenční tlak  $\Delta p$  měřit, musí se provést výpočet i pro 40 [%] průtok napájecí vody, kvůli minimálnímu výkonu kotle. Z předchozích výpočtů s výpočetními parametry a) a b) byly zjištěny dva průměry dýzy. Tyto průměry byly dosazeny do výpočtů a určila se spodní hodnotu diferenčního tlaku  $\Delta p$ , který musí měřící přístroj zaznamenat.

Výpočetní parametry (včetně pracovních parametrů, které jsou v tabulce 2):

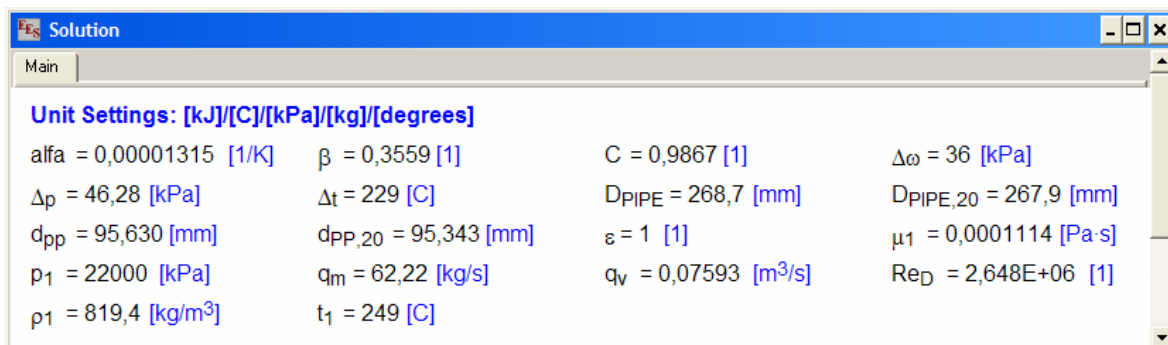
- c) 40 [%] průtok:  $q_m = 62,222$  [kg·s<sup>-1</sup>],  $d = 95,630$  [mm]
- d) 40 [%] průtok:  $q_m = 62,222$  [kg·s<sup>-1</sup>],  $d = 146,945$  [mm]

Výpočetní kód zapsaný v programu EES, je zobrazený na obr. 24. Tento obrázek představuje výpočet s výpočetními parametry c). Změnil se pouze průměr dýzy v závislosti na teplotě, který je zadán a místo něj se počítá diferenční tlak  $\Delta p$ .



Obr. 24. Equations Window z programu EES pro napájecí vodu

Výpis výsledků v EES, kde se počítá  $\Delta p$  je zobrazený na obr. 25.



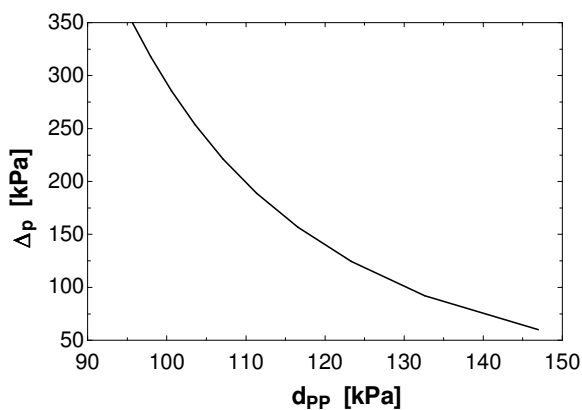
Obr. 25. Solution z programu EES pro napájecí vodu

Vypočtené výsledky:

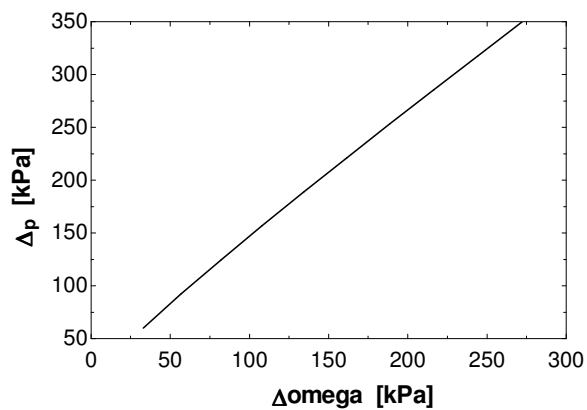
| Veličina        | 110 % průtoku        |                     | 40 % průtoku       |                    | Jednotka           |
|-----------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                 | $\Delta p = 350$ kPa | $\Delta p = 60$ kPa | $d = 95,630$ mm    | $d = 146,945$ mm   |                    |
| $\alpha$        | 0,0000135            | 0,0000135           | 0,0000135          | 0,0000135          | $1 \cdot K^{-1}$   |
| $\beta$         | 0,3559               | 0,5469              | 0,3559             | 0,5469             | 1                  |
| $C$             | 0,9867               | 0,9709              | 0,9867             | 0,9709             | 1                  |
| $\Delta \omega$ | 272,2                | 32,94               | 36                 | 4,357              | kPa                |
| $\Delta p$      | 350                  | <b>60</b>           | 46,28              | <b>7,935</b>       | kPa                |
| $\Delta t$      | 229                  | 229                 | 229                | 229                | $^{\circ}C$        |
| $D$             | 268,7                | 268,7               | 268,7              | 268,7              | mm                 |
| $D_{20}$        | 267,9                | 267,9               | 267,9              | 267,9              | mm                 |
| $d$             | 95,630               | 146,945             |                    |                    | mm                 |
| $d_{20}$        | 95,343               | <b>146,504</b>      |                    |                    | mm                 |
| $\varepsilon$   | 1                    | 1                   | 1                  | 1                  | 1                  |
| $\mu$           | 0,0001114            | 0,0001114           | 0,0001114          | 0,0001114          | Pa.s               |
| $p_1$           | 22000                | 22000               | 22000              | 22000              | kPa                |
| $q_m$           | 171,111              | 171,111             | 62,222             | 62,222             | $kg \cdot s^{-1}$  |
| $q_v$           | 0,2088               | 0,2088              | 0,07593            | 0,07593            | $m^3 \cdot s^{-1}$ |
| $Re_D$          | $7,281 \cdot 10^6$   | $7,281 \cdot 10^6$  | $2,648 \cdot 10^6$ | $2,648 \cdot 10^6$ | 1                  |
| $\rho_1$        | 819,4                | 819,4               | 819,4              | 819,4              | $kg \cdot m^{-3}$  |
| $t_1$           | 249                  | 249                 | 249                | 249                | $^{\circ}C$        |
| $\psi_C$        | 0,8                  | 0,8                 | 0,8                | 0,8                | %                  |

Tabulka 3. Výsledky jednotlivých průtoků a diferenčních tlaků napájecí vody.

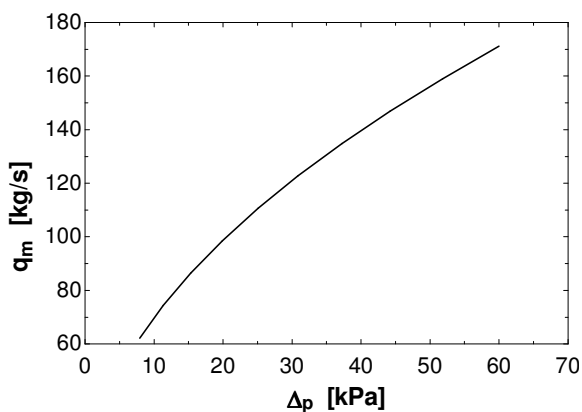
Z výsledků v tabulce 3. lze vidět, že zvolená dýza vyhovuje mezím použití, které jsou uvedeny v kapitole 7.2.1. Vyznačené údaje v tabulce 3 jsou důležité pro určení rozměrů dýzy a pro zvolení vhodného snímače diferenčního tlaku. V grafu 1 je vyobrazena závislost průměru dýzy na diferenčním tlaku, v grafu 2 je vyobrazená závislost tlakové ztráty na diferenčním tlaku, graf 3 zobrazuje závislost diferenčního tlaku na hmotnostním průtoku a graf 4 zobrazuje závislost tlakové ztráty na hmotnostním průtoku.



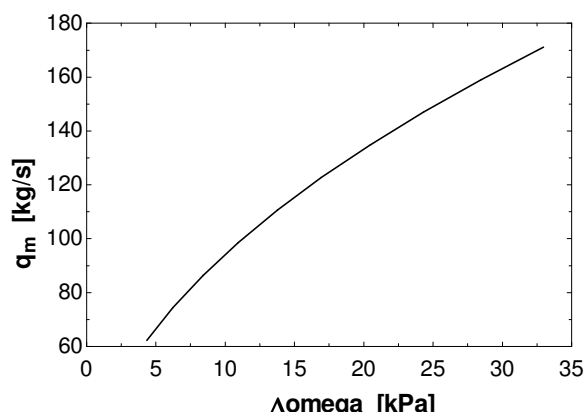
Graf 1.



Graf 2.



Graf 3.



Graf 4.

## 7.3 Návrh měření průtoku přehřáté páry

Byl zvolen stejný typ dýzy jako v případě návrhu měření průtoku napájecí vody v kapitole 7.2.

### 7.3.1 Postup výpočtu

Je stejný jako v kapitole 7.2.2 s tím rozdílem, že součinitel expanze už nebude roven 1, jako tomu byly u vody v kapalně formě, ale pro přehřátou páru se přepočítá dle rovnice (35).

- Součinitel expanze:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\kappa \cdot \tau^{\frac{2}{\kappa}}}{\kappa - 1}\right) \cdot \left(\frac{1 - \beta^4}{1 - \beta^4 \cdot \tau^{\frac{2}{\kappa}}}\right) \cdot \left(\frac{1 - \tau^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \tau}\right)} \quad [1] \quad (35)$$

kde:  $\beta$ ... je poměr průměru dýzy a potrubí ze vztahu (26)

$\tau$ ... je poměr statických tlaku před a za dýzou ze vztahu (37)

$\kappa$ ... je adiabatický exponent [1], který byl pro přehřátou páru zjištěn za pomoci internetových stránek <http://www.spiraxsarco.com>. Na této internetové adrese se nachází program, který ze známých hodnot teploty a tlaku přehřáté páry vypočte hodnotu  $\kappa$ , jak je vidět na obr. 26.

|  |       |                                   |
|--|-------|-----------------------------------|
| Pressure   | 18100 | kPa (kN/m <sup>2</sup> ) absolute |
| Superheat Temperature  | 575   | °C                                |
| <input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="Print"/> |       |                                   |
| Isentropic Coefficient (k)   |       | 1.29242                           |

Obr. 26. Ukázka výpočtu adiabatického exponentu pro přehřátou páru

- Nejistota součinitele expanze:

$$\psi_{\varepsilon} = 2 \cdot \frac{\Delta p}{p_1} \quad [\%] \quad (36)$$

kde:  $\Delta p$ ... je diferenční tlak [kPa]

$p_1$ ... je statický tlak naměřený před dýzou [kPa]

- Poměr statických tlaků před a za dýzou:

$$\tau = \frac{p_2}{p_1} \quad [1] \quad (37)$$

kde:  $p_2$ ... je statický tlak naměřený za dýzou ze vztahu (38)

$p_1$ ... je statický tlak naměřený před dýzou [kPa]

- Statický tlak naměřený za dýzou:

$$p_2 = p_1 - \Delta p \quad [kPa] \quad (38)$$

kde:  $p_1$ ... je statický tlak naměřený před dýzou [kPa]

$\Delta p$ ... je diferenční tlak [kPa]

### 7.3.2 Výpočet v EES

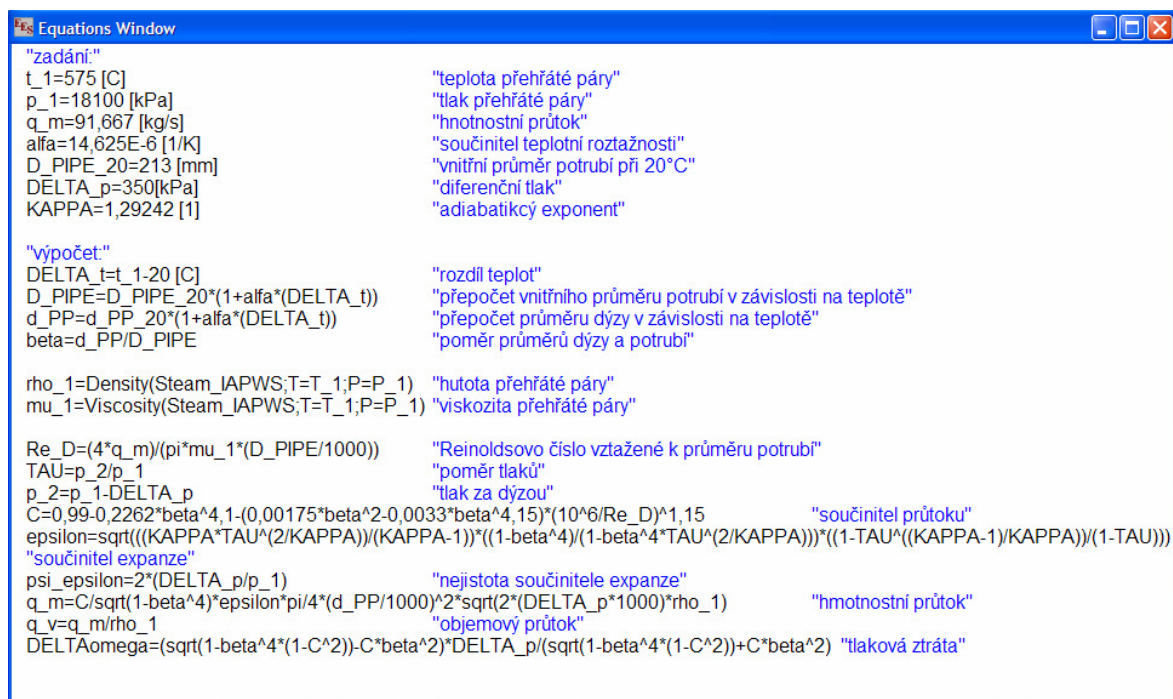
Opět byl proveden výpočet pro 110 [%] průtoku přehřáté páry, kvůli maximálnímu výkonu kotle.

Výpočetní parametry (včetně pracovních parametrů, které jsou v tabulce 2):

- 110 [%] průtok:  $q_m = 91,667 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ ,  $\Delta p = 350 \text{ [kPa]}$
- 110 [%] průtok:  $q_m = 91,667 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ ,  $\Delta p = 60 \text{ [kPa]}$

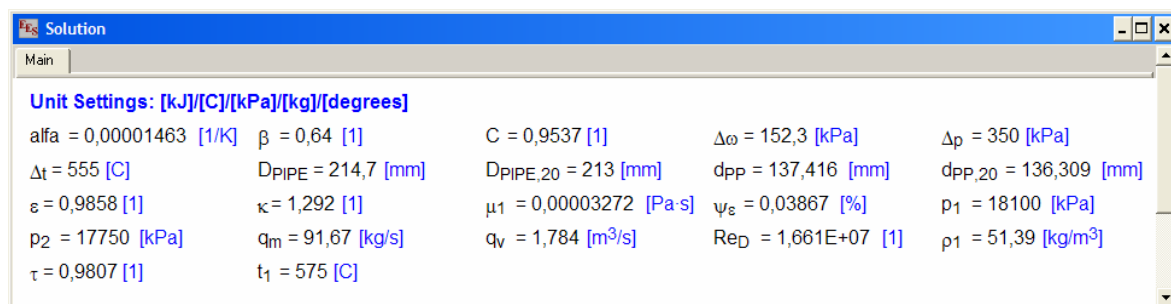
Výpočetní kód zapsaný v programu EES, je zobrazený na obr. 27. Tento obrázek představuje výpočet s výpočetními parametry a).





Obr. 27. Equations Window z programu EES pro přehřátou páru

Výpis výsledků v EES je zobrazený na obr. 28.



Obr. 28. Solution z programu EES pro přehřátou páru

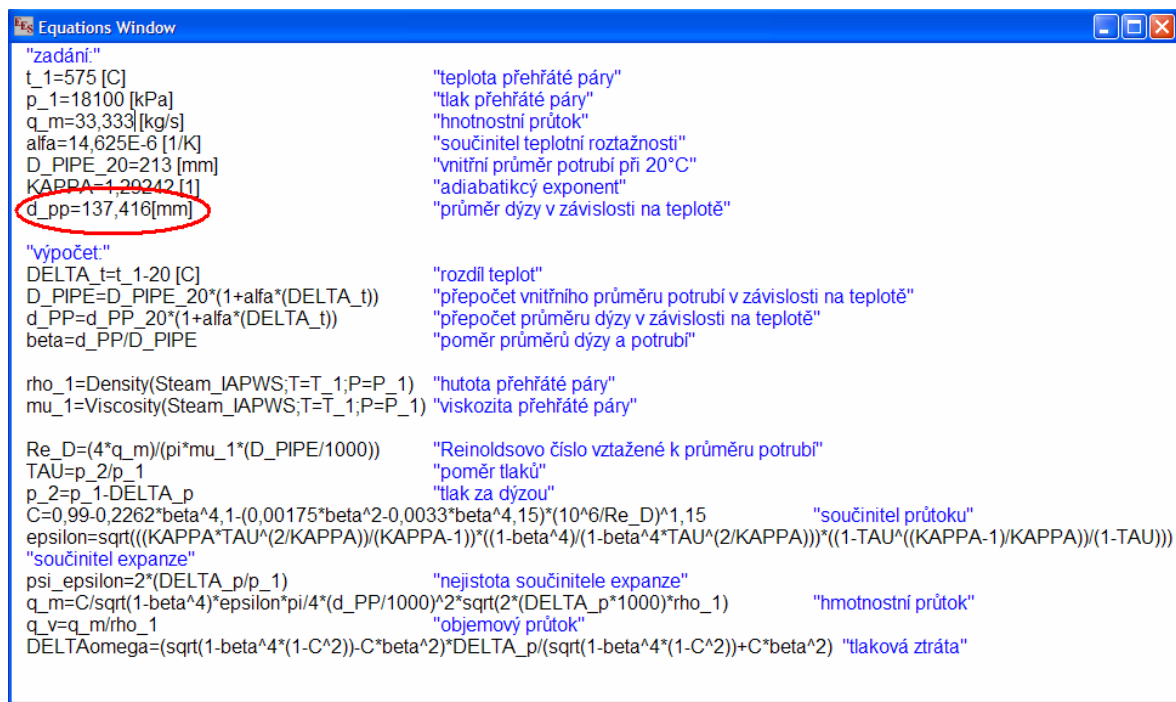
Aby bylo možné určit rozsah snímače, který bude diferenční tlak  $\Delta p$  měřit, musí se provést výpočet i pro 40 [%] průtok přehřáté páry, kvůli minimálnímu výkonu kotle. Z předchozích výpočtů s výpočetními parametry a) a b) byly zjištěny dva průměry dýzy. Tyto průměry se dosadí do výpočtů a určí se spodní hodnotu diferenčního tlaku  $\Delta p$ , který musí měřicí přístroj zaznamenat.

Výpočetní parametry (včetně pracovních parametrů, které jsou v tabulce 2):

c) 40 [%] průtok:  $q_m = 33,333$  [kg·s<sup>-1</sup>],  $d = 137,416$  [mm]

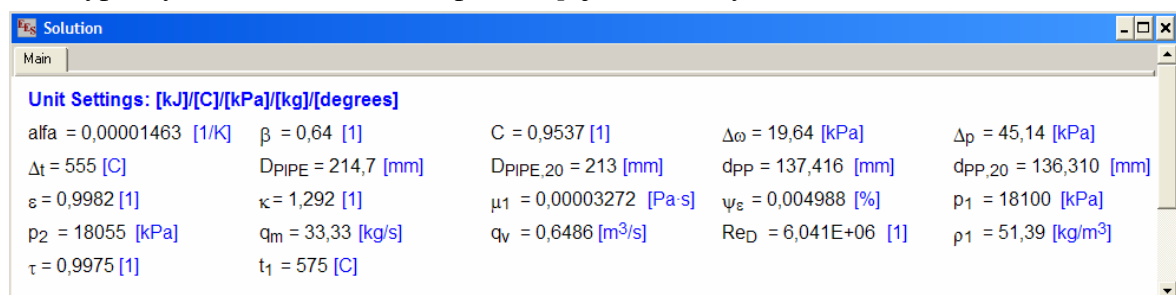
d) 40 [%] průtok:  $q_m = 33,333$  [kg·s<sup>-1</sup>],  $d = 187,993$  [mm]

Výpočetní kód zapsaný v programu EES, je zobrazený na obr. 29. Tento obrázek představuje výpočet s výpočetními parametry c). Změnil se pouze průměr dýzy v závislosti na teplotě, který je zadán a místo něj se počítá diferenční tlak  $\Delta p$ .



Obr. 29. Equations Window z programu EES pro napájecí vodu

Výpis výsledků v EES, kde se počítá  $\Delta p$  je zobrazený na obr. 30.



Obr. 30. Solution z programu EES pro přehřátou páru

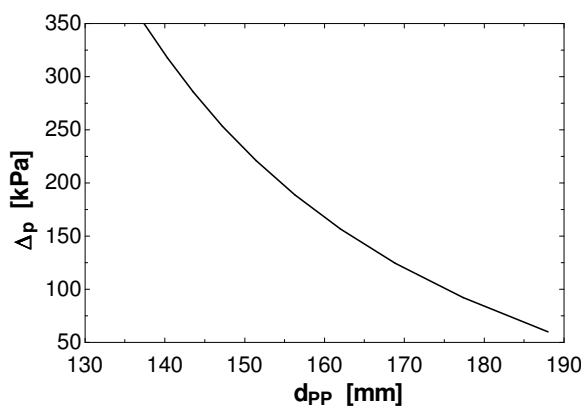
Vypočtené výsledky:

| Veličina        | 110 % průtoku        |                     | 40 % průtoku     |                  | Jednotka          |
|-----------------|----------------------|---------------------|------------------|------------------|-------------------|
|                 | $\Delta p = 350$ kPa | $\Delta p = 60$ kPa | $d = 137,416$ mm | $d = 187,993$ mm |                   |
| $\alpha$        | 0,00001463           | 0,00001463          | 0,00001463       | 0,00001463       | 1·K <sup>-1</sup> |
| $\beta$         | 0,64                 | 0,8755              | 0,64             | 0,8755           | 1                 |
| $C$             | 0,9537               | 0,8589              | 0,9537           | 0,8589           | 1                 |
| $\Delta \omega$ | 152,3                | 9,939               | 19,64            | 1,301            | kPa               |
| $\Delta p$      | <b>350</b>           | 60                  | <b>45,14</b>     | 7,857            | kPa               |
| $\Delta t$      | 555                  | 555                 | 555              | 555              | °C                |
| $D$             | 214,7                | 214,7               | 214,7            | 214,7            | mm                |
| $D_{20}$        | 213                  | 213                 | 213              | 213              | mm                |
| $d$             | 137,416              | 187,993             |                  |                  | mm                |
| $d_{20}$        | <b>136,309</b>       | 186,480             |                  |                  | mm                |
| $\epsilon$      | 0,9858               | 0,9945              | 0,9982           | 0,9993           | 1                 |

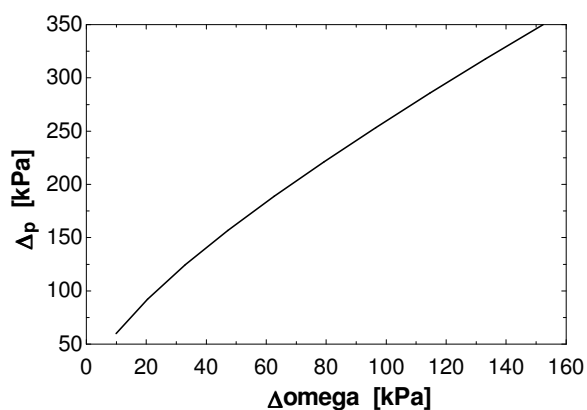
| Veličina           | 110 % průtoku                |                             | 40 % průtoku             |                          | Jednotka                        |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|
|                    | $\Delta p = 350 \text{ kPa}$ | $\Delta p = 60 \text{ kPa}$ | $d = 137,416 \text{ mm}$ | $d = 187,993 \text{ mm}$ |                                 |
| $\kappa$           | 1,29242                      | 1,29242                     | 1,29242                  | 1,29242                  | 1                               |
| $\mu$              | 0,00003272                   | 0,00003272                  | 0,00003272               | 0,00003272               | Pa·s                            |
| $\psi_\varepsilon$ | 0,03867                      | 0,00663                     | 0,004988                 | 0,0008681                | %                               |
| $p_1$              | 18100                        | 18100                       | 18100                    | 18100                    | kPa                             |
| $p_2$              | 17750                        | 18040                       | 18055                    | 18092                    | kPa                             |
| $q_m$              | 91,667                       | 91,667                      | 33,333                   | 33,333                   | kg·s <sup>-1</sup>              |
| $q_v$              | 1,784                        | 1,784                       | 0,6486                   | 0,6486                   | m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> |
| $Re_D$             | $1,661 \cdot 10^7$           | $1,661 \cdot 10^7$          | $6,041 \cdot 10^6$       | $6,041 \cdot 10^6$       | 1                               |
| $\rho_l$           | 51,39                        | 51,39                       | 51,39                    | 51,39                    | kg·m <sup>-3</sup>              |
| $\tau$             | 0,9807                       | 0,9967                      | 0,9975                   | 0,9996                   | 1                               |
| $t_l$              | 575                          | 575                         | 575                      | 575                      | °C                              |
| $\psi_C$           | 0,88                         | 1,351                       | 0,88                     | 1,351                    | %                               |

Tabulka 4. Výsledky jednotlivých průtoků a diferenčních tlaků přehřáté páry.

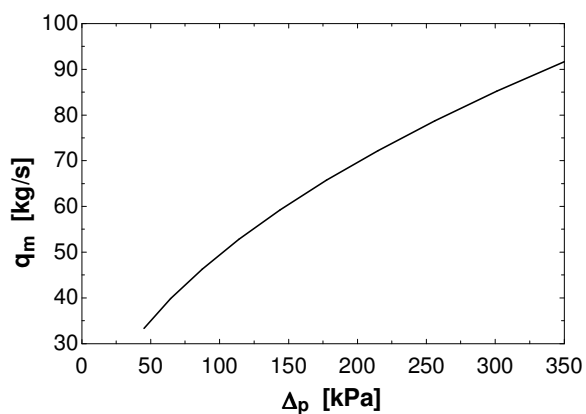
Z výsledků v tabulce 4 je vidět, že zvolená dýza nevyhovuje mezím použití, které jsou uvedeny v kapitole 7.2.1 a to konkrétně u diferenčního tlaku  $\Delta p = 350 \text{ [kPa]}$ , kde hodnota  $Re_D$  přesahuje dovolenou mez. Tuto skutečnost však můžeme zanedbat. Vyznačené údaje v tabulce 4 jsou důležité pro určení rozměrů dýzy a pro zvolení vhodného snímače diferenčního tlaku. V grafu 5 je vyobrazena závislost průměru dýzy na diferenčním tlaku, v grafu 6 je vyobrazená závislost tlakové ztráty na diferenčním tlaku, graf 7 zobrazuje závislost diferenčního tlaku na hmotnostním průtoku a graf 8 zobrazuje závislost tlakové ztráty na hmotnostním průtoku.



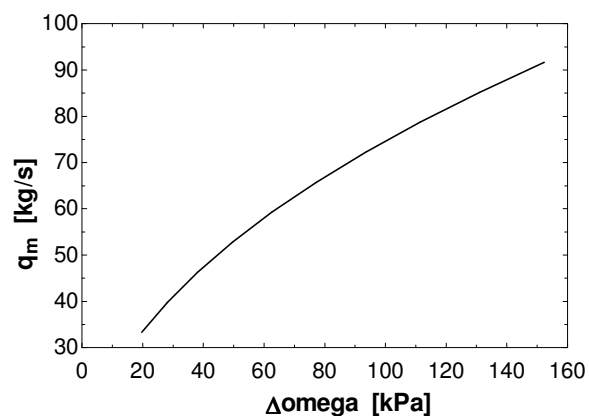
Graf 5.



Graf 6.



Graf 7.



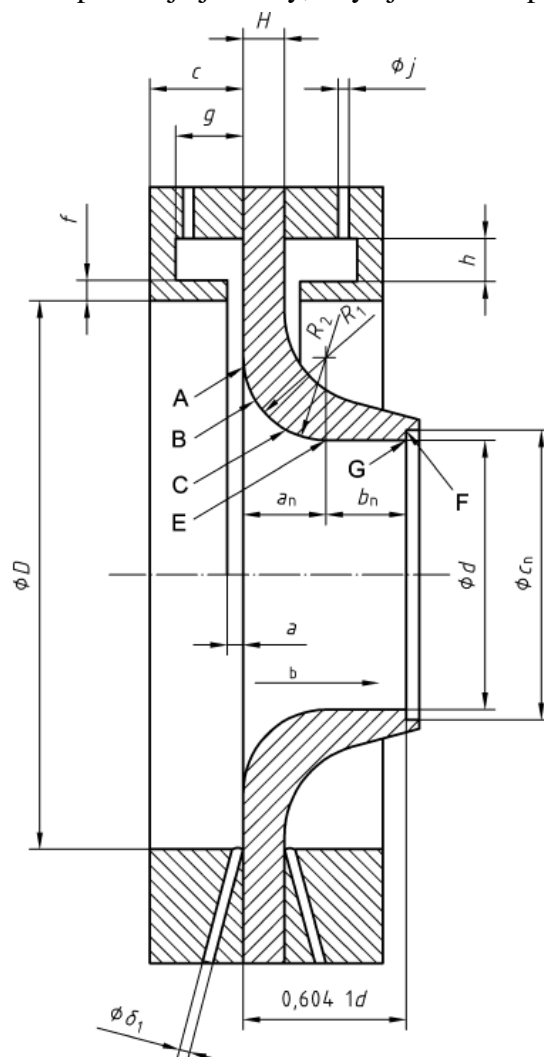
Graf 8.

## 8 URČENÍ ROZMĚRŮ DÝZY ISA 1932

Tato kapitola cituje normu [6].

Profil dýzy ISA 1932 lze vidět na *obr. 31* a je charakterizován rozlišením:

- rovinné vstupní části A, kolmé k ose
- konvergentní částí, určené dvěma oblouky o délkách B a C
- válcového hrdla E
- osazení F, které se požaduje je tehdy, když je obava z poškození hrany G



Obr. 31. Dýza ISA 1932 pro  $d \leq (2/3) \cdot D$

- Rovinná vstupní část A je omezena obvodem kružnice, soustředné s osou otáčení, o průměru  $1,5 \cdot d$ , kde  $d$  je průměr dýzy při 20 [°C], který je vypočten v kapitole 7.2 a 7.3 a vnitřním obvodem potrubí o průměru  $D$ .  
Je-li  $d = 2 \cdot D/3$ , radiální šířka této rovinné části je nulová.
- Oblouk B je tangenciální s rovinou vstupní části A, je-li  $d < (2/3) \cdot D$ , při čemž jeho rozměr  $R_1$  se rovná  $0,2 \cdot d \pm 0,02 \cdot d$  pro  $\beta < 0,5$  a  $0,2 \cdot d \pm 0,006 \cdot d$  pro  $\beta \geq 0,5$ . Jeho střed leží  $0,2 \cdot d$  od vstupní roviny a  $0,75 \cdot d$  od osy.
- Oblouk C je tangenciální s obloukem B a hrdlem E. Jeho poloměr  $R_2$  se rovná  $d/3 \pm 0,033 \cdot d$  pro  $\beta < 0,5$  a  $d/3 \pm 0,01 \cdot d$  pro  $\beta \geq 0,5$ . Jeho střed leží ve vzdálenosti  $d/2 + d/3 = 5 \cdot d/6$  od osy a ve vzdálenosti  $a_n = \left( \frac{12 + \sqrt{39}}{60} \right) \cdot d = 0,3041 \cdot d$  od rovinné přední části A.
- Hrdlo E má průměr  $d$  a délku  $b_n = 0,3 \cdot d$ .  
Za hodnotu průměru hrdla  $d$  se musí brát střední hodnota z měření alespoň čtyř průměrů, rozložených v osových rovinách a svírajících přibližně stejné úhly.  
Hrdlo musí být válcovité. Žádný průměr v žádném průřezu se nesmí lišit o více než 0,05 [%] od střední hodnoty průměru. Tento požadavek se považuje za splněný, když odchylka v délce kteréhokoli z měřených průměrů splňuje zmíněný požadavek vzhledem k odchylce od střední hodnoty průměru.
- Osazení F má průměr  $c_n$  rovný alespoň  $1,06 \cdot d$  a délku menší nebo rovnou  $0,03 \cdot d$ .  
Poměr výšky osazení  $(c_n - d)/2$  k jeho osové délce nesmí být větší než 1,2.
- Výstupní hrana G musí být ostrá.
- Celková délka dýzy F jako funkce  $\beta$  se rovná  $0,6041 \cdot d$  pro  $0,3 \leq \beta \leq 2/3$   
a  $\left( 0,4041 + \sqrt{\frac{0,75}{\beta} - \frac{0,25}{\beta^2}} - 0,5225 \right) \cdot d$  pro  $2/3 \leq \beta \leq 0,8$
- Vstupní konvergentní profil se musí ověřit tvarovou šablonou.  
Dva průměry konvergentního vstupu ve stejné rovině kolmé na osu se nesmí navzájem lišit o více než 0,1 [%] jejich střední hodnoty.
- Povrch přední strany a hrdla musí být vyleštěn tak, aby měl parametr drsnosti  $Ra \leq 10^{-4} \cdot d$ .
- Tloušťka H nesmí překročit  $0,1 \cdot D$ .

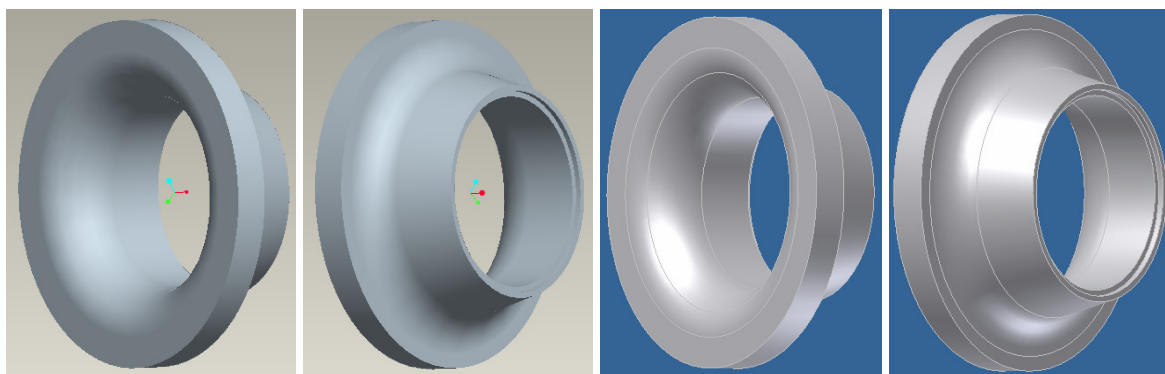
## 8.1 Rozměry dýzy pro napájecí vodu

- Rovinná vstupní část A je omezena obvodem kružnice, soustředné s osou otáčení, o průměru **219,756** [mm] a vnitřním obvodem potrubí o průměru **267,9** [mm].
- Oblouk B je tangenciální s rovinou vstupní části A, při čemž jeho rozměr  $R_1$  se rovná **29,301  $\pm$  0,879** [mm]. Jeho střed leží **29,301** [mm] od vstupní roviny a **109,878** [mm] od osy.

- Oblouk C je tangenciální s obloukem B a hrdlem E. Jeho poloměr  $R_2$  se rovná **48,835 ± 1,465** [mm]. Jeho střed leží ve vzdálenosti **122,087** [mm] od osy a ve vzdálenosti **44,549** [mm] od rovinné přední části A.
- Hrdlo E má průměr **146,504** [mm] a délku **43,951** [mm].
- Osazení F má průměr  $c_n$  rovný alespoň **155,294** [mm] a délku menší nebo rovnou **4,395** [mm].
- Výstupní hrana G musí být ostrá.
- Celková délka dýzy F jako funkce  $\beta$  se rovná **88,503** [mm]
- Tloušťka H nesmí překročit **26,79** [mm].

*Poznámka: Výrobní výkres návrhu dýzy pro měření napájecí vody je dodaný v příloze.*

Modely dýzy, které byly vymodelovány v programech Pro ENGINEER 4.0 a Autodesk Inventor Profesional 2009 jsou vidět na obr. 32 až 35.



Obr. 32. Vstupní část Obr. 33. Výstupní část Obr. 34. Vstupní část Obr. 35. Výstupní část

### 8.1.1 Materiály dýzy

Materiál dýzy a potrubí musí být stejný a to z důvodu stejného koeficientu teplotní roztažnosti, aby nedocházelo k rozdílnému roztahování a zkracování v závislosti na teplotě. Jako materiál dýzy a potrubí byla zvolena ocel 15 128.

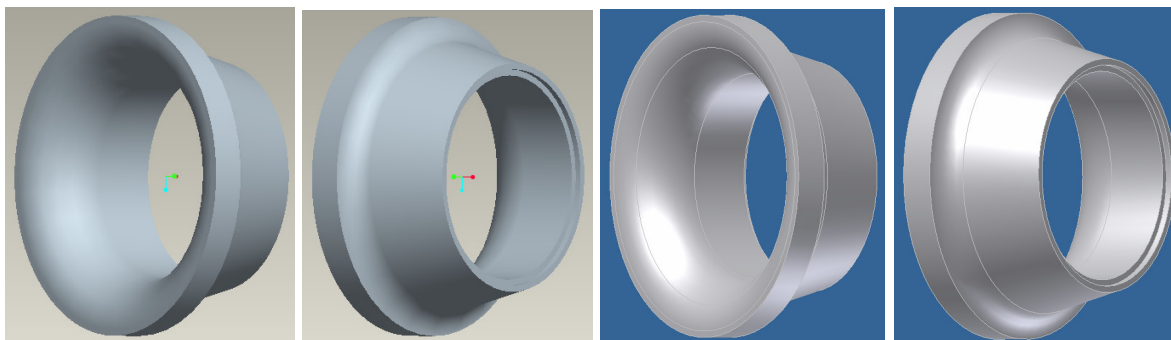
## 8.2 Rozměry dýzy pro přehřátou páru

- Rovinná vstupní část A je omezena obvodem kružnice, soustředné s osou otáčení, o průměru **204,464** [mm] a vnitřním obvodem potrubí o průměru **213** [mm].
- Oblouk B je tangenciální s rovinou vstupní části A, při čemž jeho rozměr  $R_1$  se rovná **27,262 ± 0,818** [mm]. Jeho střed leží **27,262** [mm] od vstupní roviny a **102,232** [mm] od osy.
- Oblouk C je tangenciální s obloukem B a hrdlem E. Jeho poloměr  $R_2$  se rovná **45,436 ± 1,363** [mm]. Jeho střed leží ve vzdálenosti **113,591** [mm] od osy a ve vzdálenosti **41,449** [mm] od rovinné přední části A.
- Hrdlo E má průměr **136,309** [mm] a délku **40,893** [mm].
- Osazení F má průměr  $c_n$  rovný alespoň **144,488** [mm] a délku menší nebo rovnou **4,089** [mm]. Poměr výšky osazení  $(c_n - d)/2$  k jeho osově délce nesmí být větší než 1,2.

- Výstupní hrana G musí být ostrá.
- Celková délka dýzy F jako funkce  $\beta$  se rovná **82,344** [mm]
- Tloušťka H nesmí překročit **21,3** [mm].

*Poznámka: Výrobní výkres návrhu dýzy pro měření přehřáté páry je dodaný v příloze.*

Modely dýzy, které byly vymodelovány v programech Pro ENGINEER 4.0 a Autodesk Inventor Profesional 2009 jsou vidět na *obr. 36 až 39*.



*Obr. 36. Vstupní část Obr. 37. Výstupní část Obr. 38. Vstupní část Obr. 39. Výstupní část*

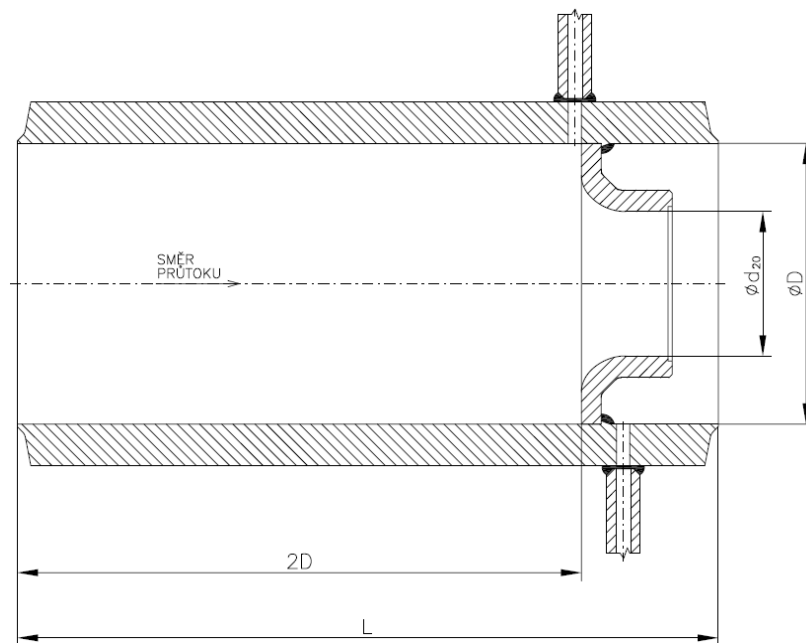
### 8.2.1 Materiál dýzy

Pro volbu materiálu platí stejné podmínky, které jsou uvedeny v kapitole 8.1.1. Jako materiál pro dýzu a potrubí byla zvolena ocel 12 020.

## 9 ODBĚRY TLAKU

### 9.1 Odběr tlaku před dýzou

Před dýzou se musí použít koutového bodového odběru tlaku, který je umístěn v potrubí, jak je ukázáno na *obr. 40*. Vzdálenost mezi osami odběru a stranou A je rovna polovině průměru nebo polovině šířky samotných odběrů, takže otvory odběrů v místě průniku stěnou lícují se stranou A. Osa jednotlivých předních odběrů musí protínat osu primárního prvku pod úhlem pokud možno co nejblížším 90°.



Obr. 40. Koutový bodový odběr tlaku

Dále je specifikován průměr  $\delta_I$  bodového odběru. Minimální průměr je určen prakticky potřebou předejít náhodnému ucpání a mít uspokojivé dynamické vlastnosti.

Pro čisté tekutiny a páry:

- pro  $\beta \leq 0,65$ :  $0,0005 \cdot D$  a nebo  $\delta_I \leq 0,03 \cdot D$
- pro  $\beta > 0,65$ :  $0,01 \cdot D$  a nebo  $\delta_I \leq 0,02 \cdot D$

Pro jakékoli hodnoty  $\beta$ :

- pro čisté tekutiny:  $1 \text{ mm} \leq a$  a nebo  $\delta_I \leq 10 \text{ mm}$
- pro páry v případě prstencových komor:  $1 \text{ mm} \leq a \leq 10 \text{ mm}$
- pro páry a zkapalněné plyny, v případě bodových odběrů:  $4 \text{ mm} \leq \delta_I \leq 10 \text{ mm}$

## 9.2 Odběry tlaku za dýzou

Zádní odběry tlaku jsou koutové bodové odběry a jsou stejné jako odběry popsané v kapitole 9.1.

### a) Snímač diferenčního tlaku pro napájecí vodu

Jako nejvhodnější snímač diferenčního tlaku byl pro tento případ zvolen: Rosemount 3015S MULTIVARIABLE, který má měřicí rozsah diferenčního tlaku  $\Delta p$  0,1 až 62 [kPa].

### b) Snímač diferenčního tlaku pro přehřátou páru

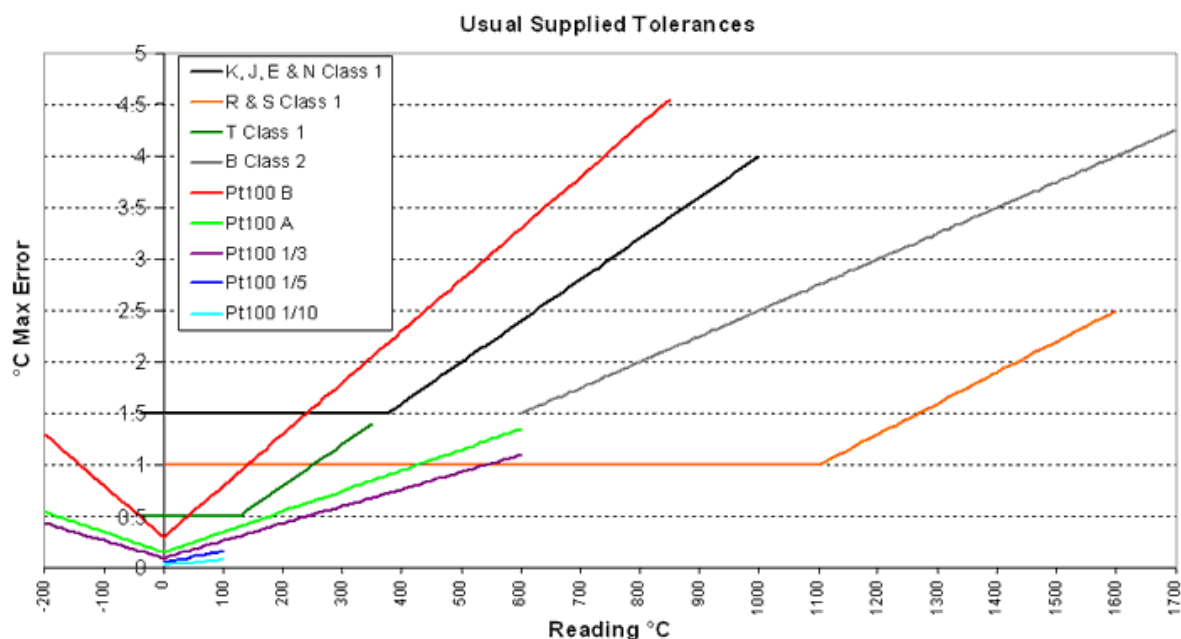
Jako nejvhodnější snímač diferenčního tlaku byl pro tento případ zvolen: Yokogawa EJX910 MULTIVARIABLE, který má měřicí rozsah diferenčního tlaku  $\Delta p$  40 až 400 [kPa].



## 10 POROVNÁNÍ NAVRŽENÝCH VARIANT Z HLEDISKA EKONOMICKÉHO A Z HLEDISKA PŘESNOSTI MĚŘENÍ

### 10.1 Posouzení vhodnosti použití termočlánku a odporového snímače teploty

Na celkovou nejistotu měření hmotnostního průtoku má také vliv snímač teploty. Na *grafu. 9* je ukázáno s jakou odchylkou a při jaké teplotě snímače měří.



Graf 9. Odchylky teplotních snímačů

Jako odporový snímač teploty byl zvolen typ Pt 100 třídy přesnosti A, který je na *grafu. 9* znázorněn světle zelenou barvou. Vzorec pro výpočet odchylky s kterou tento snímač měří při dané teplotě je (39).

$$t = \pm(0,15 + 0,002 \cdot |t|) \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (39)$$

Jako druhý porovnávací snímač teploty je zvolen termočlánek typu K, který je na *grafu 9* znázorněn černou barvou. Po dosazení teploty přehřáté páry, která je 575 [°C], do vzorce (39) a jejím vynesení na černou křivku termočlánku na *grafu 9*, byly zjištěny hodnoty v *tabulce 5*.

| Snímač teploty | Odchylka měření ve [°C] | Odchylka měření v [%] |
|----------------|-------------------------|-----------------------|
| Pt100 A        | ± 1,3                   | ± 0,23                |
| Termočlánek K  | ± 2,3                   | ± 0,4                 |

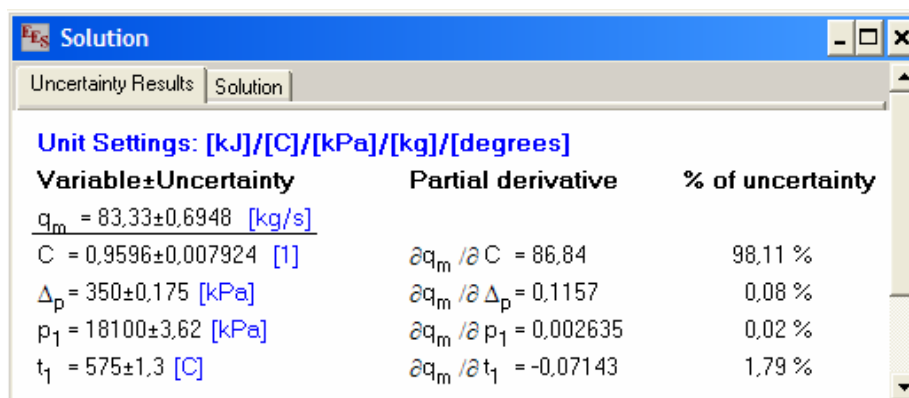
Tabulka 5. Odchylky zvolených snímačů teploty.

Z *tabulky 5* je zřejmé, že termočlánek typu K bude měřit s větší odchylkou než odporový snímač Pt100 A.

## 10.2 Porovnání navržených variant z hlediska přesnosti měření

Nejistota měření hmotnostního průtoku se vypočítá pomocí programu EES, který určí vliv nejistoty měření součinitele průtoku  $C$ , diferenčního tlaku  $\Delta p$ , statického tlaku  $p_1$  a teploty  $t_1$  na celkovou hodnotu hmotnostního průtoku.

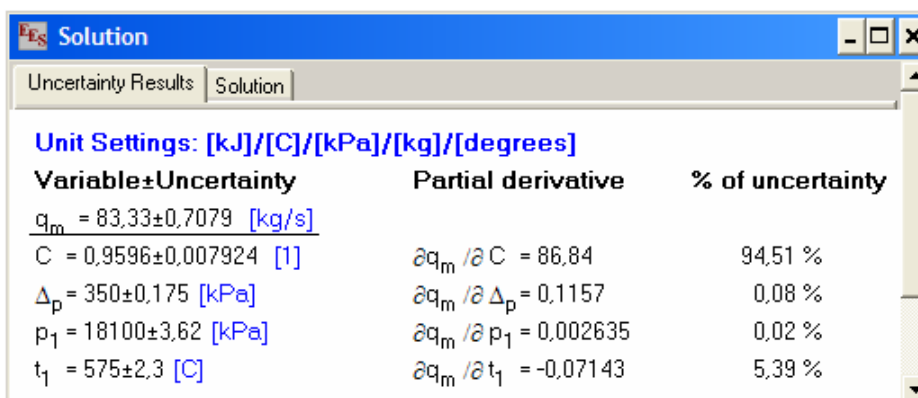
Výpočet byl proveden pro zařízení s diferenčním tlakem  $\Delta p = 350$  [kPa], který je předepsaný v pracovních parametrech *obr. 41* a *obr. 42*.



The screenshot shows the EES Solution window with the 'Solution' tab selected. The unit settings are [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]. The results table is as follows:

| Variable ± Uncertainty           | Partial derivative                          | % of uncertainty |
|----------------------------------|---|------------------|
| $q_m = 83,33 \pm 0,6948$ [kg/s]  |   |                  |
| $C = 0,9596 \pm 0,007924$ [1]    | $\partial q_m / \partial C = 86,84$         | 98,11 %          |
| $\Delta p = 350 \pm 0,175$ [kPa] | $\partial q_m / \partial \Delta p = 0,1157$ | 0,08 %           |
| $p_1 = 18100 \pm 3,62$ [kPa]     | $\partial q_m / \partial p_1 = 0,002635$    | 0,02 %           |
| $t_1 = 575 \pm 1,3$ [C]          | $\partial q_m / \partial t_1 = -0,07143$    | 1,79 %           |

*Obr. 41. Výsledné hodnoty pro odporový snímač Pt100 A*



The screenshot shows the EES Solution window with the 'Solution' tab selected. The unit settings are [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]. The results table is as follows:

| Variable ± Uncertainty           | Partial derivative                          | % of uncertainty |
|----------------------------------|---|------------------|
| $q_m = 83,33 \pm 0,7079$ [kg/s]  |   |                  |
| $C = 0,9596 \pm 0,007924$ [1]    | $\partial q_m / \partial C = 86,84$         | 94,51 %          |
| $\Delta p = 350 \pm 0,175$ [kPa] | $\partial q_m / \partial \Delta p = 0,1157$ | 0,08 %           |
| $p_1 = 18100 \pm 3,62$ [kPa]     | $\partial q_m / \partial p_1 = 0,002635$    | 0,02 %           |
| $t_1 = 575 \pm 2,3$ [C]          | $\partial q_m / \partial t_1 = -0,07143$    | 5,39 %           |

*Obr. 42. Výsledné hodnoty pro termočlánek K*

| Snímač teploty | Vliv na celkovou nejistotu [%] | Výsledný $q_m \pm$ nejistota [kg·s <sup>-1</sup> ] |
|----------------|--------------------------------|--|
| Pt100 A        | 1,79                           | 83,33 ± 0,6948                                     |
| Termočlánek K  | 5,39                           | 83,33 ± 0,7079                                     |

*Tabulka 6. Nejistoty v přesnosti měření hmotnostního průtoku*

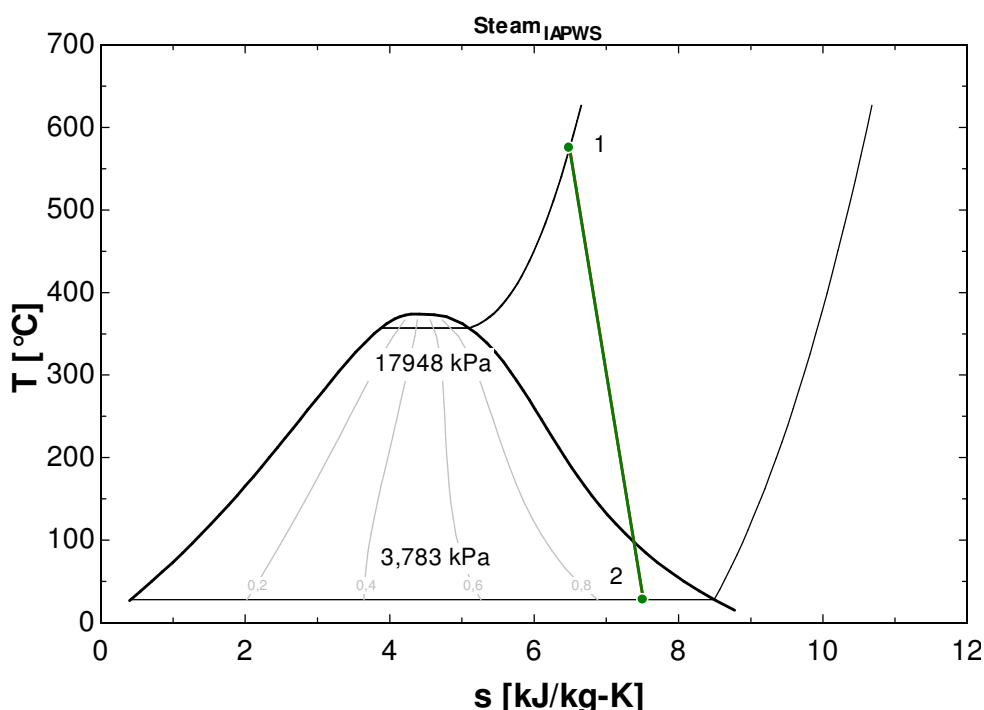
Z tabulky 6 vyplývá, že termočlánek K měří vždy s větší nejistotou než odporový snímač Pt100 A. Rozdíl v přesnosti měření těchto dvou snímačů je  $\pm 0,0131$  [kg·s<sup>-1</sup>].

### 10.3 Porovnání navržených variant z hlediska ekonomického

Aby mohlo měření pomocí dýz proběhnout, musí se seškrtnit průtok o diferenční tlak. Při tomto škrcení vznikne trvalá tlaková ztráta. Čím větší je diferenční tlak, tím větší je trvalá tlaková ztráta, jak je zobrazeno v *grafu 6*. Při měření se sníží tlak přehřáté páry vstupující do vysokotlaké části turbíny právě o hodnotu trvalé tlakové ztráty a v důsledku toho klesne i výkon turbíny. Výsledkem je negativní dopad na ekonomické hledisko.

#### 10.3.1 Výkon turbíny bez seškrčení s nulovým diferenčním tlakem

Na *grafu 10* je vidět průběh T-s diagramu přehřáté páry při expanzi na turbíně. Výpočet je proveden pro dvojnásobný hmotnostní průtok, protože je pára dopravovaná prostřednictvím dvou potrubí. V tom případě  $\dot{q}_m = 166,667 \text{ [kg}\cdot\text{s}^{-1}]$ . Průměrná cena elektrické energie v ČR je 1400 [Kč] za 1 [MWh].



Graf 10. T-s diagram pro přehřátou páru

Výpočet byl proveden v programu EES a je na *obr. 43*.

Výsledky výpočtů v EES:

| Bod | $h \text{ [kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ | $h_{ize} \text{ [kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ | $s \text{ [kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$ | $t \text{ [}^\circ\text{C}]$ | $p \text{ [kPa]}$ |
|-----|---|---|-------------------------------------|------------------------------|-------------------|
| 1   | 3487  |   | 6,489                               | 575                          | 18100             |
| 2   | 2256  |   | 7,511                               | 28                           | 3,783             |

Tabulka 7. Výsledky

| $\eta_{el} \text{ [1]}$ | $\eta_{ize} \text{ [1]}$ | $P_{el} \text{ [kW]}$ | $P_{el \text{ za rok [MWh]}}$ | Cena [mil Kč-rok <sup>-1</sup> ] |
|-------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| 0,97                    | 0,8                      | 199052                | 1743698                       | 2441,177802                      |

Tabulka 8. Výkony a účinnosti turbíny



Obr. 43. Equations Window z programu EES

### 10.3.2 Výkon turbíny při seškrcení s diferenčním tlakem 350 kPa

Výpočet byl proveden stejně jako v případě 10.3.1 s tím rozdílem, že diferenční tlak je 350 [kPa] a trvalá tlaková ztráta vzroste z 0 na 152,3 [kPa]. Na *grafu 11* je vidět, jak se změní trvalá tlaková ztráta a v tom případě i entropie v závislosti na změně diferenčního tlaku z 0 [kPa] (bod 1') na 350 [kPa] (bod 1).

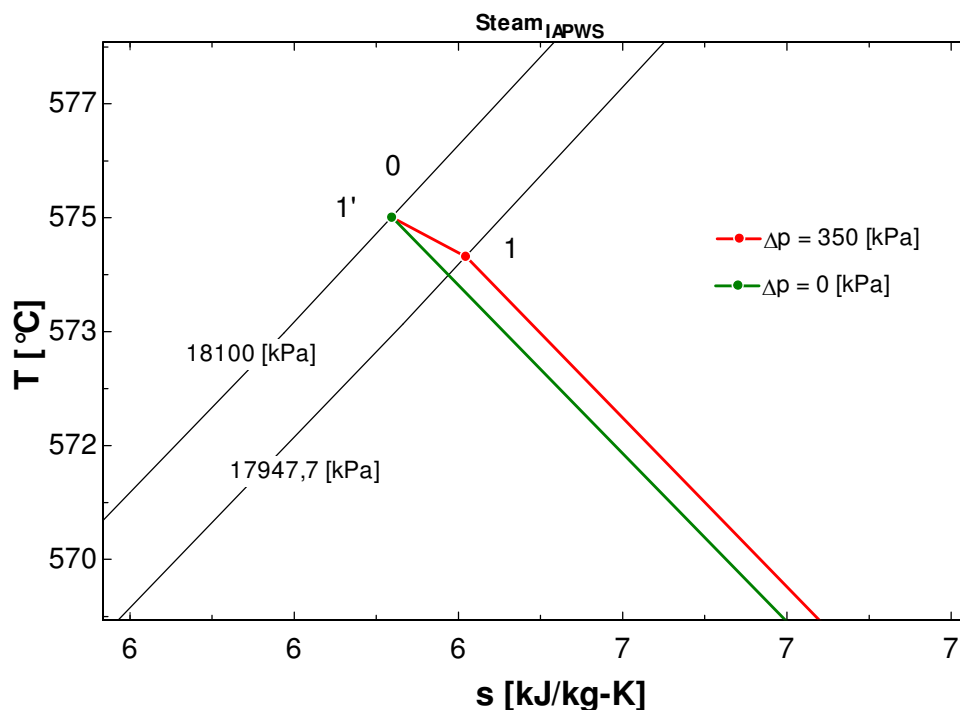
Výsledky výpočtů v EES:

| Bod | $h$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | $h_{ize}$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] | $s$ [kJ·kg <sup>-1</sup> ] | $t$ [°C] | $p$ [kPa] |
|-----|---|---|----------------------------|----------|-----------|
| 0   | 3487  |   | 6,489                      | 575      | 18100     |
| 1   | 3487  | 1949  | 6,493                      | 574,5    | 17947,7   |
| 2   | 2257  |   | 7,514                      | 28       | 3,783     |

Tabulka 9. Výsledky

| $\eta_{el}$ [1] | $\eta_{ize}$ [1] | $P_{el}$ [kW] | $P_{el}$ za rok [MWh] | Cena [mil Kč·rok <sup>-1</sup> ] |
|-----------------|------------------|---------------|-----------------------|----------------------------------|
| 0,97            | 0,8              | 198916        | 1742501               | 2439,501138                      |

Tabulka 10. Výkony a účinnosti turbíny



Graf. 11. T-s diagram pro přehřátou páru

Konečné zhodnocení ekonomického hlediska navržených variant:

| Varianta      | $\Delta p$ [kPa] | $\Delta \omega$ [kPa] | $P_{el}$ [kW] | $P_{el \text{ za rok}}$ [MWh] | Cena<br>[mil Kč·rok <sup>-1</sup> ] |
|---------------|------------------|-----------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Bez škrcení   | 0                | 0                     | 199052        | 1743698                       | 2441,177802                         |
| Se seškrcením | 350              | 152,3                 | 198916        | 1742501                       | 2439,501138                         |
| Rozdíl        |                  |                       | 136           | 1197                          | 1,676664                            |

Tabulka 11. Konečné ekonomické zhodnocení

Z tabulky 11 je patrné, jakým negativním způsobem působí seškrcení na elektrický výkon a tím pádem i na cenu vyrobené elektrické energie.

#### 10.4 Ekonomické srovnání termočlánu K a odporového snímače teploty Pt100 A

Na ekonomickou bilanci má vliv nejistota měření hmotnostního průtoku. Dle předcházejícího porovnání navržených variant z hlediska přesnosti měření v kapitole 10.2 byly určeny nejistoty přesnosti měření hmotnostního průtoku, které jsou zapsány v tabulce 6 pro termočlánek K a odporový snímač teploty Pt100 A. Dle těchto nejistot byly vypočteny hodnoty v tabulce 12.

| Varianta      | Termočlánek K                 |                                     | Pt100 A                       |                                     |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
|               | $P_{el \text{ za rok}}$ [MWh] | Cena<br>[mil.Kč·rok <sup>-1</sup> ] | $P_{el \text{ za rok}}$ [MWh] | Cena<br>[mil.Kč·rok <sup>-1</sup> ] |
| Se seškrcením | 1742501 ± 14802               | 2439,5 ± 20,723                     | 1742501 ± 14528               | 2439,5 ± 20,34                      |

## 11 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo všeobecné seznámení se způsoby měření průtoku tekutin u nás i ve světě. Porovnává nejčastěji v energetice používané metody měření průtoku a to jak z hlediska přesnosti měření, měřicího rozsahu, teploty a tlaku proudícího média, tak i z hlediska trvalé tlakové ztráty způsobené měřením.

První část práce popisuje přehled základních fyzikálních principů termínů a definic používaných při měření průtoku tekutin. Jsou zde popsány základní charakteristiky měřících metod a jejich rozdělení podle měřené veličiny.

Další část obsahuje postupný rozbor způsobů měření průtoku a popisuje činnost, funkci a použití jednotlivých průtokoměrů v závislosti na měřeném médiu. Seznamuje nás se základními a nejčastěji používanými průřezovými měřili.

Poslední praktická část popisuje návrh dýzy pro měření průtoku přehřáté páry a napájecí vody pro dva snímače diferenčního tlaku s různými rozsahy. Hlavním úkolem bylo zjistit vnitřní průměr dýzy při 20 [°C]  $d_{20}$ , ze kterého se následně určili další rozměry, potřebné k samotnému návrhu dýzy. Při výpočtu bylo vycházeno z pracovních parametrů. Pro měření průtoku jak přehřáté páry, tak i napájecí vody byla zvolena normalizovaná dýza ISA 1932 dle normy ČSN EN ISO 5167 – 3. Je zde popsán způsob zapojení snímače diferenčního tlaku a odběru tlaku před a za dýzou.

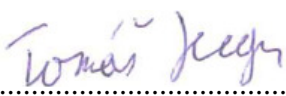
Byl zde porovnán ekonomický dopad navržených variant měření průtoku na výrobu elektrické energie. Byly zde řešeny dvě situace: 1. stav, kdy průtok není seškrcen a z toho plyne, že diferenční tlak je roven nule a 2. stav, kdy průtok je seškrcen a to tak, že diferenční tlak  $\Delta p$  je roven 350 [kPa]. Pokud vzroste diferenční tlak, vzroste i trvalá tlaková ztráta. Tlak přehřáté páry, která vstupuje na turbínu, se snižuje právě o tuto hodnotu trvalé tlakové ztráty. Nižší tlak způsobí pokles entalpického spádu a v důsledku toho i pokles elektrického výkonu. Výpočtem bylo zjištěno, že pokud by byla k měření průtoku přehřáté páry využívána dýza, která měří s diferenčním tlakem 350 [kPa], přijde elektrárna o 1676664 [Kč] za rok.

Návrh dýzy byl porovnán i z hlediska nejistoty měření hmotnostního průtoku. Bylo provedeno srovnání vlivu měření teploty pomocí dvou různých snímačů na celkovou nejistotu. Ze srovnání vyplývá, že odporový snímač Pt100 A měří s větší přesností než termočlánek K. Na závěr byl vypočten výkon elektrárny naměřený pomocí Pt100 A s nejistotou  $\pm 14528$  [MWh] za rok a to představuje  $\pm 20,34$  [mil.Kč] za rok. Při měření termočlánekem K je tato nejistota  $\pm 14802$  [MWh] za rok a to je  $\pm 20,723$  [mil.Kč] za rok.

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Michal Stáňa PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Ostravě: 20. 5. 2010



.....

(podpis autora)

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ČSN EN ISO 5167 – 1 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky, Český normalizační institut, listopad 2003
- [2] <http://www.voda.tzb-info.cz> – Měření průtoku tekutin – principy průtokoměrů
- [3] <http://www.hgf.vsb.cz> – Snímače průtoku kapalin a plynů
- [4] *Metrologie průtoku 2008*. 1. vydání. Okružní 31, 638 00, Brno : Český metrologický institut, 2008. 254 s. ISBN 978-80-254-2196-3.
- [5] ČSN EN ISO 5167 – 2 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 2: Clony, Český normalizační institut, listopad 2003
- [6] ČSN EN ISO 5167 – 3 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 3: Dýzy a Venturiho dýzy, listopad 2003
- [7] ČSN EN ISO 5167 – 4 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 4: Venturiho trubice, listopad 2003
- [8] <http://www.mattech.cz> – dýzy

## SEZNAM PŘÍLOH

- |   |                  |
|---|------------------|
| Příloha č. 1: Výrobní výkres návrhu dýzy pro měření napájecí vody | (počet stran: 1) |
| Příloha č. 2: Výrobní výkres návrhu dýzy pro měření přehřáté páry | (počet stran: 1) |